

# Guía para la Calibración de Instrumentos de Pesaje de Funcionamiento No Automático



EURAMET/cg/18  
Versión 4.0 (11/2015)

**CEM** CENTRO ESPAÑOL  
DE METROLOGÍA



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE INDUSTRIA, ENERGÍA  
Y TURISMO

# Guía de Calibración

EURAMET cg-18

Versión 4.0



## **GUÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE PESAJE DE FUNCIONAMIENTO NO AUTOMÁTICO**

### **Propósito**

Este documento se ha realizado para mejorar la equivalencia y el reconocimiento mutuo de los resultados de calibración obtenidos por los laboratorios que realizan calibraciones de instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático.

Edición digital de la Traducción al español de: "EURAMET/cg-018v.04: Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighting Instruments"

## **Traducción**

Título original: "EURAMET/cg-18/v4.0: Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighting Instruments"

La traducción se ha realizado por un grupo de trabajo formado por:

Javier Bisbal (CEM)  
M<sup>a</sup> Nieves Medina (CEM)  
Eduardo Méndez (Airbus)  
Jose Ángel Robles (CEM)  
José Sanchez (LEM)  
Eugeni Vilalta (ENAC)

La traducción ha sido revisada y corregida por personal del Área de Masa del Centro Español de Metrología (CEM), C/ Del Alfar, 2 Tres Cantos, 28760 – Madrid. España

## **Autoría e Impresión**

Este documento fue realizado en el Comité Técnico de Masa y Magnitudes Derivadas de EURAMET e.V.

4<sup>a</sup> edición Noviembre 2015  
3<sup>a</sup> edición Marzo 2011  
2<sup>a</sup> edición Septiembre 2010  
1<sup>a</sup> edición Enero 2009

La 4<sup>a</sup> edición fue realizada gracias a la cooperación entre:

Stuart Davidson (NPL, Reino Unido)  
Klaus Fritsch (Mettler Toledo, Suiza)  
Matej Grum (MIRS, Eslovenia)  
Andrea Malengo (INRIM, Italia)  
Nieves Medina (CEM, España)  
George Popa (INM, Rumanía)  
Norbert Schnell (Sartorius, Alemania)

EURAMET e.V.  
Bundesallee 100  
D-38116 Braunschweig  
Alemania

Correo electrónico: [secretariat@euramet.org](mailto:secretariat@euramet.org)  
Teléfono: +49 531 592 1960

## **Derechos de autor**

Esta publicación es una traducción de la Guía de Calibración EURAMET "Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighting Instruments" (EURAMET/cg-18/v4.0). Los derechos de autor del documento original los posee © EURAMET e.V. 2007. Esta Guía de Calibración no puede copiarse para su venta posterior ni ser reproducida parcialmente. No puede responsabilizarse ni a EURAMET, ni a los autores o a cualquier otra persona que haya contribuido a la creación de este documento de cualquier daño o perjuicio causado como consecuencia de la información contenida en el mismo.

## **Publicaciones de guías**

Este documento proporciona orientación sobre métodos de medida para campo específicos de medición. Al aplicar las recomendaciones incluidas en este documento los

laboratorios puede obtener resultados de calibración que son reconocidos y aceptados por toda Europa. Los planteamientos considerados no son obligatorios y son para la orientación de los laboratorios de calibración. El documento se ha realizado como un medio para promover un criterio consistente para las buenas prácticas de medida que conduzca y apoye la acreditación de laboratorios.

La guía puede ser utilizada, por ejemplo entidades nacionales de acreditación, revisores por pares, etc, sólo como referencia por terceras partes. Si la guía se adopta como parte de un requisito por cualquiera de las partes, será solamente para esa aplicación y la Secretaría de EURAMET debe ser informada de este hecho.

Bajo petición EURAMET puede involucrar a terceros en consultas a los interesados cuando se planifique la revisión de la guía. Por favor, regístrese para ello en la Secretaría de EURAMET.

No se asume ninguna responsabilidad ni se proporciona ninguna garantía de que este documento o la información contenida en el mismo sean adecuados para ningún propósito en particular. No puede responsabilizarse ni a EURAMET, ni a los autores o a cualquier otra persona que haya contribuido a la creación de este documento de cualquier daño o perjuicio causado como consecuencia de la información contenida en el mismo. Los interesados que utilicen la guía deberán indemnizar a EURAMET en consecuencia.

#### **Información adicional**

Para más información sobre este documento, contacte con su representante nacional en el Comité Técnico de Masa y Magnitudes Derivadas de EURAMET (véase [www.euramet.org](http://www.euramet.org)).

**NIPO: 074-16-003-X**

# Guía de Calibración

EURAMET cg-18

Versión 4.0

## Guía para la Calibración de Instrumentos de Pesaje de Funcionamiento No Automático

### CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	ALCANCE.....	1
3	TERMINOLOGÍA Y SÍMBOLOS.....	2
4	ASPECTOS GENERALES DE LA CALIBRACIÓN.....	2
4.1	Elementos de la calibración.....	2
4.2	Carga de ensayo e indicación.....	4
4.3	Cargas de ensayo.....	8
4.4	Indicaciones.....	11
5	MÉTODOS DE MEDIDA.....	12
5.1	Ensayo de repetibilidad.....	12
5.2	Ensayo de errores de indicación.....	13
5.3	Ensayo de excentricidad.....	14
5.4	Mediciones auxiliares.....	16
6	RESULTADOS DE MEDIDA.....	16
6.1	Repetibilidad.....	17
6.2	Errores de indicación.....	17
6.3	Efecto de la carga descentrada.....	18
7	INCERTIDUMBRE DE MEDIDA.....	19
7.1	Incertidumbre típica de los valores discretos.....	19
7.2	Incertidumbre típica de una característica.....	26
7.3	Incertidumbre expandida en la calibración.....	27
7.4	Incertidumbre típica del resultado de una pesada.....	27
7.5	Incertidumbre expandida del resultado de una pesada.....	35
8	CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN.....	37
8.1	Información general.....	37
8.2	Información sobre el procedimiento de calibración.....	37
8.3	Resultados de medida.....	38
8.4	Información adicional.....	38
9	VALOR DE MASA O VALOR CONVENCIONAL DE MASA.....	39
9.1	Valor de masa.....	39
9.2	Valor convencional de masa.....	40
10	REFERENCIAS.....	40

ANEXO A: RECOMENDACIONES SOBRE LA ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE 42	
A1 Fórmulas para la densidad del aire .....	42
A2 Variaciones de los parámetros que contribuyen a la densidad del aire .....	43
A3 Incertidumbre de la densidad del aire.....	45
ANEXO B: FACTOR DE COBERTURA $k$ PARA LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DE MEDIDA.....	47
B1 Objetivo .....	47
B2 Distribución normal y fiabilidad suficiente .....	47
B3 Distribución normal, sin suficiente fiabilidad .....	47
B4 Determinando $k$ para distribuciones no normales .....	48
ANEXO C: FÓRMULAS QUE DESCRIBEN LOS ERRORES EN RELACIÓN A LAS INDICACIONES.....	49
C1 Objetivo .....	49
C2 Relaciones funcionales.....	49
C3 Términos sin relación con las lecturas.....	56
ANEXO D: SÍMBOLOS.....	57
ANEXO E: INFORMACIÓN SOBRE EL EMPUJE DEL AIRE.....	59
E1 Densidad de los patrones de masa .....	59
E2 Empuje del aire para pesas conformes a la recomendación internacional OIML R111.....	59
ANEXO F: EFECTOS DE CONVECCIÓN .....	61
F1 Relación entre la temperatura y el tiempo.....	61
F2 Cambio de la masa aparente.....	64
ANEXO G: PESADA MÍNIMA .....	66
ANEXO H: EJEMPLOS .....	69
H1 Instrumento de 220 g de capacidad y 0,1 mg de escalón.....	69
H2 Instrumento de 60 kg de capacidad, multi-escalón.....	88
H3 Instrumento de 30 000 kg de capacidad, escalón de 10 kg .....	108
H4 Determinación de la función de aproximación del error.....	129

# Guía para la Calibración de Instrumentos de Pesaje de Funcionamiento No Automático

## EURAMET cg-18 Versión 4.0

### 1 INTRODUCCIÓN

Los instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático (IPFNA) se utilizan ampliamente para determinar el valor de una carga en términos de masa. Aunque para algunas aplicaciones especificadas por la legislación, los IPFNA están sujetos al control metrológico legal (aprobación de modelo, verificación, etc.) hay una necesidad creciente de confirmación de sus cualidades metrológicas mediante calibración, por ejemplo, cuando lo requieren las normas ISO 9001 o ISO/IEC 17025.

### 2 ALCANCE

Este documento contiene orientaciones para la calibración estática de instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático de indicación automática (a partir de ahora llamados "instrumento"), en particular en lo que se refiere a

1. mediciones a realizar,
2. cálculo de los resultados de medida,
3. determinación de la incertidumbre de medida,
4. contenidos de los certificados de calibración.

El objeto de la calibración es la indicación proporcionada por el instrumento en respuesta a una carga aplicada. Los resultados se expresan en unidades de masa. El valor de la carga indicado por el instrumento está afectado por la aceleración local de la gravedad, la temperatura y densidad de la carga, y la temperatura y densidad del aire que la rodea.

La incertidumbre de medida depende significativamente de las propiedades del propio instrumento y no sólo de los equipos del laboratorio de calibración; puede reducirse hasta cierto punto aumentando el número de mediciones llevadas a cabo en una calibración. Esta guía no especifica límites superiores o inferiores para la incertidumbre de medida.

Compete al cliente y al laboratorio de calibración acordar el valor previsto de la incertidumbre de medida para que sea adecuada considerando el uso del instrumento y el coste de la calibración.

Aunque este documento no tiene la intención de presentar uno o unos pocos procedimientos uniformes de uso obligatorio, proporciona una orientación

general para establecer procedimientos de calibración cuyos resultados puedan considerarse equivalentes en el seno de las Organizaciones Miembros de EURAMET.

Cualquiera de estos procedimientos debe incluir, para un número limitado de cargas de ensayo, la determinación del error de indicación y la incertidumbre de medida asociada a estos errores. El procedimiento debería parecerse tanto como sea posible a las operaciones de pesaje que el usuario realiza rutinariamente, por ejemplo, usando la función (de equilibrio) de tara, pesando cargas discretas, pesando continuamente en sentido creciente, o decreciente, o ambos.

El procedimiento puede incluir también reglas sobre cómo obtener, a partir de los resultados, consejos para el usuario del instrumento respecto de los errores, e incertidumbre de medida asociada, de las indicaciones que puedan obtenerse en las condiciones normales de uso del instrumento, y/o reglas sobre cómo convertir una indicación obtenida para un objeto pesado en un valor de masa o valor de masa convencional de dicho objeto.

La información contenida en esta guía está destinada a, y debería considerarse por,

1. organismos que acreditan laboratorios para la calibración de instrumentos de pesaje,
2. laboratorios de calibración acreditados para la calibración de instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático,
3. laboratorios de ensayo o fabricantes que usan instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático calibrados para realizar mediciones relacionadas con la calidad de producción según requisitos de gestión de calidad (por ejemplo, serie ISO 9000, ISO 10012, ISO/IEC 17025).

### **3 TERMINOLOGÍA Y SÍMBOLOS**

La terminología empleada en este documento se basa principalmente en documentos existentes:

- JCGM 100 [1] para los términos relacionados con la determinación de los resultados y la incertidumbre de medida,
- OIML R76 [2] (o EN 45501 [3]) para los términos relacionados con el funcionamiento, la construcción y la caracterización metrológica de los instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático,
- OIML R111 [4] para los términos relacionados con las pesas patrón,
- JCGM 200 [5] para los términos relacionados con la calibración.

Estos términos no se explican en este documento, pero se indican las referencias en su primera aparición.

Los símbolos cuyo significado no sea evidente, se explican cuando se utilizan por primera vez. Los que se usan en más de una sección se recogen en el Anexo D.

## **4 ASPECTOS GENERALES DE LA CALIBRACIÓN**

### **4.1 Elementos de la calibración**

La calibración consiste en

1. aplicar cargas de ensayo al instrumento bajo condiciones especificadas,
2. determinar el error o variación de la indicación y
3. evaluar la incertidumbre de medida que se atribuye a los resultados

#### **4.1.1 Rango de calibración**

Si el cliente no solicita otra cosa, la calibración se extiende al rango de pesaje completo [2] (o [3]) desde cero al alcance máximo  $Max$ . El cliente puede especificar una cierta parte del campo de pesaje, limitado por una carga mínima  $Min'$  y una carga máxima a pesar  $Max'$ , o cargas nominales individuales, para las que solicita calibración.

En un instrumento multi-rango [2] (o [3]), el cliente debería identificar el o los rangos a calibrar. El párrafo precedente puede aplicarse a cada rango por separado.

#### **4.1.2 Lugar de calibración**

La calibración se realiza normalmente en el lugar de uso del instrumento.

Si un instrumento se traslada a otro lugar después de la calibración, es probable que el comportamiento del instrumento sea alterado por posibles efectos de

1. diferencias en la aceleración local de la gravedad,
2. variaciones en las condiciones ambientales,
3. condiciones mecánicas y térmicas durante el transporte,

y la calibración puede dejar de ser válida. Así pues, debería evitarse el traslado del instrumento después de la calibración, a no ser que se haya demostrado claramente la inmunidad a estos efectos de un instrumento particular, o de un tipo particular de instrumentos. Cuando no se ha demostrado esto, el certificado de calibración no debería aceptarse como evidencia de trazabilidad.

#### **4.1.3 Condiciones previas, preparaciones**

No debería realizarse la calibración a menos que:

1. el instrumento pueda identificarse fácilmente,
2. todas sus funciones estén libres de efectos de la contaminación o daños y todas las funciones esenciales para la calibración operen satisfactoriamente,
3. la presentación de los valores de peso no sea ambigua y las indicaciones que se den sean de fácil lectura,
4. las condiciones normales de uso (corrientes de aire, vibraciones, estabilidad del emplazamiento, etc.) sean adecuadas al instrumento a calibrar,

5. el instrumento haya estado alimentado antes de la calibración durante un periodo adecuado, por ejemplo el plazo de calentamiento establecido para el instrumento, o el establecido por el cliente,
6. el instrumento esté nivelado, si aplica,
7. el instrumento haya sido sometido a una carga aproximadamente igual a la carga máxima de ensayo, una vez como mínimo, o recomendablemente, de manera repetida.

Aquellos instrumentos concebidos para ser ajustados regularmente antes de su uso, deberían ser ajustados antes de la calibración, si el cliente no indica lo contrario. El ajuste debe realizarse con los medios aplicados normalmente por el cliente y siguiendo las instrucciones del fabricante, cuando estén disponibles. El ajuste puede realizarse mediante cargas de ensayo externas o integradas en el instrumento.

En balanzas de alta resolución (resolución relativa mejor  $1 \times 10^{-5}$  de la escala completa), el procedimiento más adecuado es realizar el ajuste de la balanza inmediatamente antes de la calibración y también inmediatamente antes del uso.

Los instrumentos equipados con un dispositivo de puesta a cero automático o un dispositivo de seguimiento de cero [2] (o [3]) deberían calibrarse con el dispositivo operativo o no, según establezca el cliente.

En el caso de calibraciones *in situ*, debería pedirse al usuario del instrumento que asegure que durante la calibración se den las condiciones normales de uso. De esta manera, los efectos perturbadores, como corrientes de aire, vibraciones, o inclinación de la plataforma de medida, estarán incluidos, en la medida de lo posible, en los valores medidos y, por tanto, se incluirán en la incertidumbre de medida obtenida.

## 4.2 Carga de ensayo e indicación

### 4.2.1 Relación básica entre carga e indicación

En términos generales, la indicación de un instrumento es proporcional a la fuerza ejercida por un objeto de masa  $m$  sobre el receptor de carga:

$$I = k_s mg(1 - \rho_a / \rho) \quad (4.2.1-1)$$

siendo	$g$	aceleración local de la gravedad
	$\rho_a$	densidad del aire ambiente
	$\rho$	densidad del objeto
	$k_s$	factor de ajuste

Los términos del paréntesis representan la reducción de la fuerza debida al empuje del aire sobre el objeto.

### 4.2.2 Efecto del empuje del aire

En el estado actual de la técnica, se utilizan pesas patrón que han sido calibradas

en términos de la masa convencional  $m_c^1$ , para el ajuste y/o calibración de los instrumentos de pesaje. En principio, para un valor de referencia de la densidad del aire  $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$ , la balanza debería indicar la masa convencional  $m_c$  del objeto de ensayo.

El ajuste se realiza en una densidad del aire  $\rho_{as}$ , de manera que los efectos de  $g$  y del empuje del aire real de la pesa de ajuste, con masa convencional  $m_{cs}$  queden incluidos en el factor de ajuste  $k_s$ . Así, en el momento del ajuste la indicación  $I_s$  es

$$I_s = m_{cs} \quad (4.2.2-1)$$

Este ajuste se realiza bajo condiciones caracterizadas por los valores reales de  $g_s$ ,  $\rho_s \neq \rho_c$  y  $\rho_{as} \neq \rho_0$ , identificadas por el sufijo "s", siendo válido solamente bajo estas condiciones. Para otro cuerpo de masa convencional  $m_c$ , con  $\rho \neq \rho_s$ , pesado en el mismo instrumento pero bajo condiciones diferentes:  $g \neq g_s$  y  $\rho_a \neq \rho_{as}$  la indicación es, en general, (despreciando términos de 2º orden o superior)[6]:

$$I = m_c (g / g_s) \{ 1 - (\rho_a - \rho_0)(1/\rho - 1/\rho_s) - (\rho_a - \rho_{as}) / \rho_s \} \quad (4.2.2-3)$$

Si no se desplaza el instrumento, no habrá variación de  $g$ , de manera que  $g/g_s = 1$ . A partir de ahora se hará esta suposición.

La indicación de la balanza será exactamente la masa convencional del cuerpo, sólo en algunos casos particulares, los más evidentes son

- $\rho_a = \rho_{as} = \rho_0$
- La pesada se realiza a  $\rho_a = \rho_{as}$  y el cuerpo tiene una densidad  $\rho = \rho_s$

La fórmula se sigue simplificando en las situaciones en que algunas de las densidades son iguales:

- a) si se pesa un cuerpo en un aire de densidad de referencia:  $\rho_a = \rho_0$ , entonces

$$I = m_c [ 1 - (\rho_a - \rho_{as}) / \rho_s ] \quad (4.2.2-4)$$

- b) si se pesa un cuerpo de la misma densidad que la pesa de ajuste:  $\rho = \rho_s$ , entonces nuevamente (como en el caso a)

<sup>1</sup> La masa convencional  $m_c$  de un cuerpo se ha definido en [4] como el valor de masa  $m$  de una pesa de densidad de referencia  $\rho_c = 8000 \text{ kg/m}^3$  que equilibra dicho cuerpo a 20 °C en aire de densidad  $\rho_0$  :

$$m_c = m \{ (1 - \rho_0 / \rho) / (1 - \rho_0 / \rho_c) \} \quad (4.2.2-2)$$

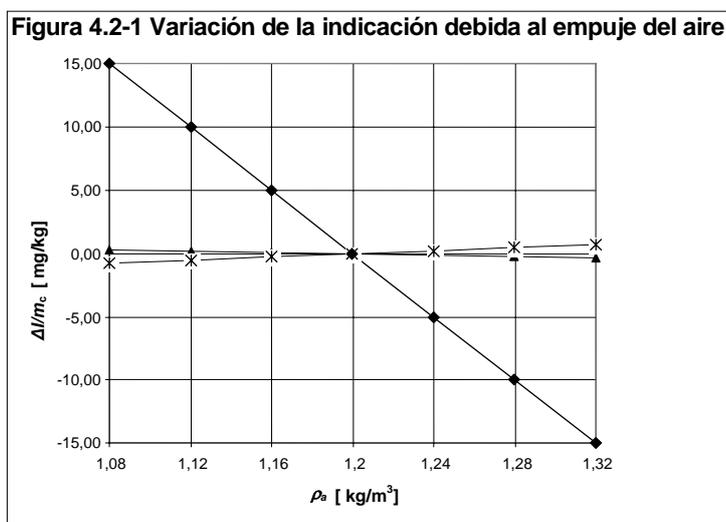
con  $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3 =$  valor de referencia de la densidad del aire.

$$I = m_c \left[ 1 - (\rho_a - \rho_{as}) / \rho_s \right] \quad (4.2.2-5)$$

c) si se pesa en aire de la misma densidad que en el momento del ajuste:  $\rho_a = \rho_{as}$ , entonces

$$I = m_c \left[ 1 - (\rho_a - \rho_0) (1/\rho - 1/\rho_s) \right] \quad (4.2.2-6)$$

La figura 4.2-1 muestra ejemplos de la magnitud de los cambios relativos  $\Delta I / m_c = (I - m_c) / m_c$  en el caso de un instrumento ajustado con pesas patrón de  $\rho_s = \rho_c$ , cuando se calibra con patrones de masa de densidades diferentes, pero típicas.



La línea ▲ es válida para un cuerpo de  $\rho = 7\,810 \text{ kg/m}^3$ , pesado en  $\rho_a = \rho_{as}$  (como para el caso c anterior)

La línea × es válida para un cuerpo de  $\rho = 8\,400 \text{ kg/m}^3$ , pesado en  $\rho_a = \rho_{as}$  (como para el caso c anterior)

La línea ◆ es válida para un cuerpo de  $\rho = \rho_s = \rho_c$  después de ajuste en  $\rho_{as} = \rho_0$  (como para el caso b anterior)

Es obvio que en estas condiciones, una variación en la densidad del aire tiene un efecto mayor que una variación en la densidad del cuerpo.

En el Anexo A se proporciona más información sobre la densidad del aire y en el Anexo E sobre el empuje del aire sobre las pesas patrón.

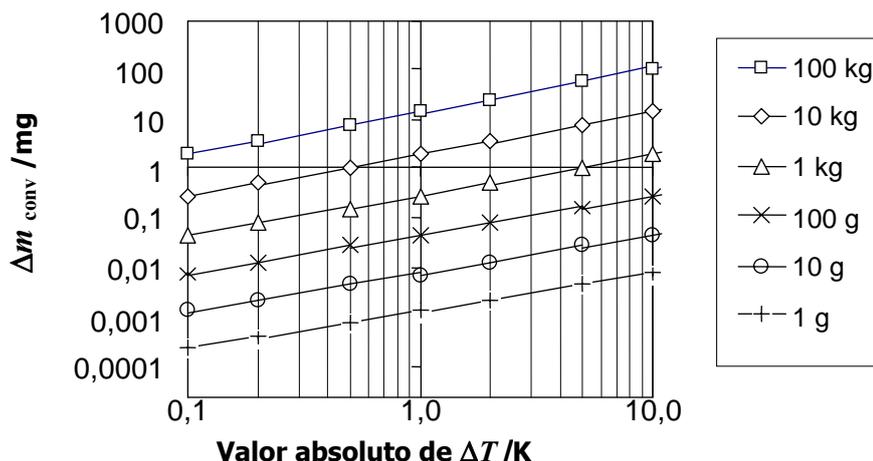
### 4.2.3 Efectos de convección

Cuando se han transportado pesas al lugar de calibración, puede que no tengan la misma temperatura que el instrumento y su entorno. La diferencia de temperatura  $\Delta T$  se define como la diferencia entra la temperatura de una pesa patrón y la temperatura del aire que la rodea. En este caso, debe tomarse nota de dos fenómenos:

- Una diferencia de temperatura inicial  $\Delta T_0$  puede reducirse a un valor menor  $\Delta T$  mediante aclimatación durante un tiempo; esto sucede más rápidamente para pesas pequeñas que para pesas mayores.
- Cuando se pone una pesa en el receptor de carga, la diferencia real  $\Delta T$  generará un flujo de aire a su alrededor que comportará fuerzas parásitas que producirán un cambio aparente  $\Delta m_{\text{conv}}$  de su masa. El signo de  $\Delta m_{\text{conv}}$  es normalmente opuesto al signo de  $\Delta T$ , siendo su valor mayor para pesas mayores que para pesas pequeñas.

Las relaciones entre cualesquiera de las magnitudes mencionadas:  $\Delta T_0$ ,  $\Delta t$ ,  $\Delta T$ ,  $m$  y  $\Delta m_{\text{conv}}$ , no son lineales y dependen de las condiciones de intercambio de calor entre las pesas y su ambiente - véase [7].

**Figura 4.2-2 Efectos de la convección**



La figura 4.2-2 da una impresión de la magnitud del cambio aparente de la masa en relación con la diferencia de temperatura para algunos valores seleccionados de masa.

Este efecto debería tomarse en cuenta, bien permitiendo que las pesas se aclimaten hasta el punto en que el cambio remanente  $\Delta m_{\text{conv}}$  sea despreciable respecto de la incertidumbre requerida por el cliente, o bien considerando el posible cambio de indicación en la evaluación de incertidumbres. El efecto puede ser significativo para patrones de alta exactitud, por ejemplo para pesas de clase  $E_2$  o  $F_1$  en R 111 [4].

En el Anexo F se proporciona información más detallada.

#### 4.2.4 Corrección por empuje del aire para el valor de referencia de masa

Para determinar los errores de indicación de un instrumento se aplican patrones de masa de masa convencional conocida  $m_{cCal}$ . Su densidad  $\rho_{cCal}$  es, normalmente, diferente del valor de referencia  $\rho_c$  y la densidad del aire  $\rho_{aCal}$  en el momento de la calibración es, normalmente, diferente de  $\rho_0$ .

El error de indicación  $E$  es

$$E = I - I_{ref} \quad (4.2.4-1)$$

donde  $I_{ref}$  es el valor de referencia de la indicación del instrumento, llamado posteriormente valor de referencia de la masa,  $m_{ref}$ . Debido a los efectos de empuje del aire, convección, deriva y otros que pueden comportar términos menores de corrección  $\delta m_x$ ,  $m_{ref}$  no es exactamente igual al valor convencional de la masa  $m_{cCal}$ ,

$$m_{ref} = m_{cCal} + \delta m_B + \delta m_{..} \quad (4.2.4-2)$$

La corrección por el empuje del aire  $\delta m_B$  está afectada por los valores de  $\rho_s$  y  $\rho_{as}$ , que eran válidos en el momento del ajuste pero que, normalmente, son desconocidos. Se supone que se han utilizado patrones de la densidad de referencia  $\rho_s = \rho_c$ . Teniendo en cuenta (4.2.2-3), la expresión general de la corrección es

$$\delta m_B = -m_{cCal} [(\rho_{aCal} - \rho_0)(1/\rho_{cCal} - 1/\rho_c) + (\rho_{aCal} - \rho_{as})/\rho_c] \quad (4.2.4-3)$$

Para la densidad del aire se consideran dos situaciones:

Si el instrumento se ha ajustado inmediatamente antes de la calibración, entonces  $\rho_{as} = \rho_{aCal}$ . Esto simplifica (4.2.4-3) en:

$$\delta m_B = -m_{cCal}(\rho_{aCal} - \rho_0)(1/\rho_{cCal} - 1/\rho_c) \quad (4.2.4-4)$$

Si el instrumento se ha ajustado independientemente de la calibración, en aire de densidad desconocida  $\rho_{as}$ , no es posible realizar la corrección para el último término de la ecuación (4.2.4-3), que forma parte intrínsecamente del error de indicación. La corrección a aplicar también debería ser (4.2.4-4) [10].

El sufijo "Cal" se omitirá a partir de ahora excepto cuando sea necesario para evitar confusiones.

### 4.3 Cargas de ensayo

Las cargas de ensayo deberían consistir, preferiblemente, en patrones de masa trazables a la unidad SI de masa. Sin embargo, se pueden usar otras cargas de ensayo, para ensayos comparativos (por ejemplo, ensayos con descentramiento, ensayos de repetibilidad) o para la simple carga del instrumento (por ejemplo, precarga, carga de tara que debe ser equilibrada, carga de sustitución).

#### 4.3.1 Patrones de masa

La trazabilidad de las masas que se utilicen como patrones debe conseguirse por una calibración [8] que consista en la

1. determinación de la masa convencional  $m_c$  y/o de la corrección  $\delta m_c$  a su valor nominal  $m_N$ :  $\delta m_c = m_c - m_N$ , junto con la incertidumbre expandida de calibración  $U_{95}$ , o
2. confirmación de que  $m_c$  está dentro de errores máximos permitidos especificados  $emp$ :  $m_N - (emp - U_{95}) \leq m_c \leq m_N + (emp - U_{95})$

Los patrones deberían, además, cumplir con los siguientes requisitos, hasta donde sea apropiado según su exactitud:

3. densidad  $\rho_s$  suficientemente cercana a  $\rho_c = 8\,000\text{ kg/m}^3$ ,
4. un acabado superficial adecuado para prevenir un cambio de masa a través de la contaminación por suciedad o capas de adhesión,
5. propiedades magnéticas tales que se minimice la interacción con el instrumento a calibrar.

Las pesas que cumplen con las especificaciones pertinentes de la Recomendación Internacional OIML R 111 [4] deberían cumplir estos requisitos.

Los errores máximos permitidos, o las incertidumbres de calibración de los patrones de masa deben ser compatibles con el escalón  $d$  [2] (o [3]) del instrumento y/o las necesidades del cliente respecto de la incertidumbre de la calibración de su instrumento.

#### 4.3.2 Otras cargas de ensayo

Para ciertas aplicaciones mencionadas en la segunda frase de 4.3, no es esencial que se conozca la masa convencional de la carga de ensayo. En estos casos, se pueden usar cargas que no sean patrones de masa, considerando debidamente los siguientes aspectos:

1. forma, material, composición que debería permitir un fácil manejo,
2. forma, material, composición que debería permitir estimar fácilmente la posición del centro de gravedad,
3. su masa debe permanecer constante durante todo el periodo en que se usan para la calibración,
4. su densidad debería ser fácil de estimar,
5. las cargas de baja densidad (por ejemplo, depósitos rellenos con arena o grava) pueden requerir una especial atención debido al empuje del aire. Puede ser necesario el seguimiento de la temperatura y la presión atmosférica durante todo el periodo de uso de las cargas durante la calibración.

#### 4.3.3 Uso de cargas de sustitución

Una carga de ensayo cuya masa convencional debe ser conocida, debería estar compuesta enteramente por patrones de masa. Pero si ello no es posible, o los patrones de masa disponibles no son suficientes para calibrar el rango del instrumento, o el rango acordado con el cliente; puede usarse en su sustitución cualquier otra carga que satisfaga el apartado 4.3.2. El instrumento en calibración se usa como comparador para ajustar la carga de sustitución  $L_{\text{sub}}$  de manera que origine aproximadamente la misma indicación  $I$  que la carga correspondiente  $L_{\text{St}}$  formada por patrones de masa.

Una primera carga de ensayo  $L_{\text{T1}}$  formada por patrones de masa  $m_{\text{ref}}$  se indica como:

$$I(L_{\text{St}}) = I(m_{\text{ref}}) \quad (4.3.3-1)$$

Después de retirar  $L_{\text{St}}$  se deposita una carga de sustitución  $L_{\text{sub1}}$  y se ajusta para dar aproximadamente la misma indicación:

$$I(L_{\text{sub1}}) \approx I(m_{\text{ref}}) \quad (4.3.3-2)$$

de manera que

$$L_{\text{sub1}} = m_{\text{ref}} + I(L_{\text{sub1}}) - I(m_{\text{ref}}) = m_{\text{ref}} + \Delta I_1 \quad (4.3.3-3)$$

La siguiente carga de ensayo  $L_{\text{T2}}$  se forma añadiendo  $m_{\text{ref}}$

$$L_{\text{T2}} = L_{\text{sub1}} + m_{\text{ref}} = 2m_{\text{ref}} + \Delta I_1 \quad (4.3.3-4)$$

$m_{\text{ref}}$  se reemplaza nuevamente por una carga de sustitución de  $\approx L_{\text{sub1}}$  ajustada a  $\approx I(L_{\text{T2}})$ .

El procedimiento puede repetirse para generar cargas de ensayo  $L_{\text{T3}}, \dots, L_{\text{Tn}}$

$$L_{\text{Tn}} = nm_{\text{ref}} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \dots + \Delta I_{n-1} \quad (4.3.3-5a)$$

Sin embargo, con cada sustitución, la incertidumbre de la carga de ensayo total aumenta sustancialmente más que si estuviera formada íntegramente por patrones de masa, debido a los efectos de la repetibilidad y la resolución del instrumento. Véase también el apartado 7.1.2.6<sup>2</sup>.

Si la carga de ensayo  $L_{\text{T1}}$  está formada por más de un patrón de masa, es posible conformar  $N$  cargas de ensayo individuales  $m_{\text{ref},k}$  ( $k = 1, \dots, N$ ) con la condición

$$m_{\text{ref},1} < m_{\text{ref},2} < \dots < m_{\text{ref},N} = m_{\text{ref}} = L_{\text{T1}} \quad (4.3.3-6)$$

<sup>2</sup> Ejemplo: para un instrumento con  $Max = 5000$  kg,  $d = 1$  kg, la incertidumbre típica de los patrones de masa de 5 t de clase de exactitud  $M_1$  – tomando su valor nominal y utilizando (7.1.2-3) – es cercana a 150 g, mientras que la incertidumbre típica de una carga de ensayo hecha a partir de un patrón de masa de 1 t y una carga de sustitución de 4 t, utilizando (7.1.2-16a), será alrededor de 1,2 kg. En ese ejemplo las contribuciones a la incertidumbre debidas al empuje y la deriva son despreciables. De igual forma se asume que la incertidumbre de la indicación sólo comprende el error de redondeo sin carga y con carga.

A continuación, se sustituye  $L_{T1}$  por una carga de sustitución  $L_{\text{sub1}}$  y, entonces, de nuevo pueden añadirse consecutivamente las cargas de ensayo  $m_{\text{ref},k}$ . Las cargas individuales de ensayo deberán referirse como  $L_{Tn,k}$  con

$$L_{Tn,k} = (n-1)m_{\text{ref}} + m_{\text{ref},k} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \dots + \Delta I_{n-1}. \quad (4.3.3-5b)$$

## 4.4 Indicaciones

### 4.4.1 Generalidades

Cualquier indicación  $I$  referida a una carga de ensayo es básicamente la diferencia entre las indicaciones  $I_L$  bajo carga e  $I_0$  sin carga, antes de aplicar la carga

$$I = I_L - I_0 \quad (4.4.1-1a)$$

Es preferible registrar las indicaciones sin carga junto con las indicaciones bajo carga para todas las mediciones. En el caso de que el usuario del instrumento tenga en cuenta la vuelta al cero tras cualquier carga durante el uso normal del instrumento, por ejemplo, en el caso de una deriva sustancial, la indicación puede corregirse conforme a la ecuación (4.4.1-1b)<sup>3</sup>. Sin embargo, el registro de las indicaciones sin carga puede ser redundante cuando el procedimiento de ensayo indica la puesta a cero de la balanza antes de aplicar una carga de ensayo.

Para cualquier carga de ensayo, incluyendo la carga nula, la indicación  $I$  del instrumento se lee y registra solamente cuando puede considerarse estable. Cuando la alta resolución del instrumento, o las condiciones ambientales en el lugar de calibración impiden que las indicaciones sean estables, debería registrarse un valor promedio junto con información sobre la variabilidad observada (por ejemplo, dispersión de los valores, deriva unidireccional).

Durante los ensayos de la calibración, deben registrarse las indicaciones originales, no los errores ni las variaciones de la indicación.

### 4.4.2 Resolución

Las indicaciones se obtienen normalmente como múltiplos enteros del escalón  $d$ .

A discreción del laboratorio de calibración y con el consentimiento del cliente, pueden utilizarse medios para obtener indicaciones con mayor resolución que  $d$ , por ejemplo, cuando se determina la conformidad con una especificación y se desea la menor incertidumbre. Estos medios pueden ser:

---

<sup>3</sup> En caso de deriva lineal la lectura corregida es:

$$I = I_L - (I_0 + I_{0i})/2 \quad (4.4.1-1b)$$

siendo  $I_0$  e  $I_{0i}$  las indicaciones sin carga antes y después de que se aplique la carga.

1. conmutar el indicador a un escalón menor  $d_T < d$  ("modo servicio"). En este caso, las indicaciones se obtienen como múltiplos enteros de  $d_T$ , o
2. aplicar pequeñas cargas de ensayo adicionales en pasos de  $d_T = d/5$  o  $d/10$  para determinar más precisamente la carga en que la indicación cambia sin ambigüedad de  $I'$  a  $I' + d$ . ("método del punto de salto"). En este caso, se anota la indicación  $I'$  junto con el valor  $\Delta L$  de las  $n$  pequeñas cargas de ensayo adicionales necesarias para aumentar  $I'$  en un escalón  $d$ .

La indicación  $I_L$  es

$$I_L = I' + d/2 - \Delta L = I' + d/2 - nd_T \quad (4.4.2-1)$$

Cuando se utiliza el método del punto de salto, se recomienda aplicarlo también a las indicaciones sin carga.

## 5 MÉTODOS DE MEDIDA

Normalmente se realizan ensayos para determinar

- la repetibilidad de las indicaciones,
- los errores de las indicaciones, y
- el efecto sobre la indicación de la aplicación descentrada de una carga.

Un laboratorio de calibración que decida el número de mediciones de su procedimiento de calibración rutinaria, debería considerar que, en general, un mayor número de mediciones tiende a reducir la incertidumbre de medida, pero tiende a aumentar el coste.

Los detalles de los ensayos realizados en una calibración particular pueden fijarse por acuerdo entre el cliente y el laboratorio de calibración, considerando el uso normal del instrumento. Pueden acordarse, además, ensayos o comprobaciones adicionales que puedan ayudar a la evaluación del comportamiento del instrumento bajo condiciones especiales de uso. Cualquier acuerdo de este tipo debe ser consistente con el número mínimo de ensayos especificado en los siguientes apartados.

### 5.1 Ensayo de repetibilidad

El ensayo consiste en la colocación repetida de la misma carga en el receptor de carga, en la medida de lo posible, bajo condiciones idénticas de manejo de la carga y del instrumento y bajo condiciones de ensayo constantes.

No es necesario que las cargas de ensayo estén calibradas ni verificadas, a no ser que los resultados sirvan para la determinación de los errores de indicación según 5.2. La carga de ensayo debería, en la medida de lo posible, consistir en un sólo cuerpo.

El ensayo se realiza al menos con una carga de ensayo  $L_T$  que debería

seleccionarse de manera que tenga una relación razonable con  $Max$  y la resolución del instrumento, para permitir una valoración del comportamiento del instrumento. Para los instrumentos de escalón constante  $d$  es frecuente una carga  $0,5 Max \leq L_T \leq Max$ ; que se reduce, a menudo, en los instrumentos que alcanzan varias toneladas. Para los instrumentos multi-escalón [2] (o [3]) puede preferirse una carga inferior y cercana a  $Max_1$ . Para instrumentos multi-rango, puede ser suficiente una carga inferior y cercana al alcance máximo que corresponda al escalón más pequeño.

Puede acordarse por las partes un valor especial de  $L_T$  cuando esto esté justificado por una aplicación particular del instrumento.

El ensayo puede realizarse en más de un punto, con cargas de ensayo  $L_{Tj}$ ,  $1 \leq j \leq k_L$  con  $k_L$  = número de puntos de ensayo.

Antes del ensayo, se pone a cero la indicación. La carga debe aplicarse como mínimo 5 veces, o como mínimo 3 veces cuando  $L_T \geq 100$  kg.

Se registran las indicaciones  $I_{Li}$  para cada colocación de la carga. Después de cada retirada de la carga, como mínimo se debería comprobar que la indicación es cero, pudiéndose ajustar a cero si no lo es; el registro de las indicaciones sin carga  $I_{0i}$  es recomendable según el apartado 4.4.1. Además, debería registrarse el estado de la puesta a cero o del dispositivo de cero, si existe.

## 5.2 Ensayo de errores de indicación

Este ensayo se realiza con  $k_L \geq 5$  cargas de ensayo diferentes  $L_{Tj}$ ,  $1 \leq j \leq k_L$ , distribuidas de forma razonablemente uniforme en el rango de pesaje normal, o en puntos de ensayos individuales acordados según el apartado 4.1.1. Ejemplos de cargas de ensayo:

- $k_L = 5$ : cero o  $Min$ ;  $0,25 Max$ ;  $0,5 Max$ ;  $0,75 Max$ ;  $Max$ . Las cargas de ensayo reales pueden desviarse de estos valores hasta  $0,1 Max$ , siempre que la diferencia entre los valores de dos cargas de ensayo consecutivas sea al menos  $0,2 Max$ ,
- $k_L = 11$ : cero o  $Min$ , 10 valores a incrementos de  $0,1 Max$  hasta  $Max$ . Las cargas de ensayo reales pueden desviarse de estos valores hasta  $0,05 Max$ , siempre que la diferencia entre los valores de dos cargas de ensayo consecutivas sea al menos  $0,08 Max$ .

El objeto de este ensayo es la evaluación de la exactitud del instrumento en todo el rango de pesaje.

Cuando se ha acordado un alcance de calibración significativamente menor, puede reducirse consecuentemente el número de cargas de ensayo, siempre que haya al menos 3 puntos de ensayo incluyendo  $Min'$  y  $Max'$ , y que la diferencia entre dos cargas de ensayo consecutivas no sea mayor que  $0,15 Max$ .

Es necesario que las cargas de ensayo estén formadas por patrones de masa adecuadas o cargas de sustitución según el apartado 4.3.3.

Antes del ensayo, se pone la indicación a cero. Las cargas de ensayo  $L_{Tj}$  se aplican normalmente una vez de alguna de estas maneras:

1. situando las cargas de ensayo de forma creciente con descarga entre las cargas, correspondiendo a la mayoría de usos de los instrumentos para pesar cargas individuales,
2. situando las cargas de ensayo de forma creciente sin descarga entre cargas; los resultados pueden verse afectados por efectos de deriva pero se reduce la cantidad de cargas que deben ponerse y quitarse del receptor de carga en comparación con el punto 1,
3. situando las cargas de ensayo de forma creciente y a continuación quitando las cargas de forma decreciente, que es el procedimiento descrito para los ensayos de verificación en la referencia [2] (o [3]), con los mismos comentarios que en el punto 2,
4. quitando las cargas a partir de  $Max$ , que simula el uso de un instrumento tipo tolva para pesaje sustractivo, con los mismos comentarios que en el punto 2.

En instrumentos multi-escalón, véase la referencia [2] (o [3]), pueden modificarse los métodos precedentes para cargas menores de  $Max$ , aplicando cargas de tara crecientes y/o decrecientes, tarando el instrumento y aplicando una carga de ensayo cercana pero no mayor que  $Max_1$  para obtener indicaciones con escalón  $d_1$ .

En instrumentos multi-rango según la referencia [2] (o [3]), el cliente debería identificar el rango(s) a calibrar (véase el apartado 4.1.1, 2º párrafo)

Pueden realizarse ensayos adicionales para evaluar el comportamiento del instrumento en condiciones especiales de uso, por ejemplo la indicación después de una operación de tara de la balanza, la variación de la indicación bajo carga constante durante un cierto tiempo, etc.

Puede repetirse el ensayo, o cargas individuales, para combinar el ensayo con el ensayo de repetibilidad del apartado 5.1.

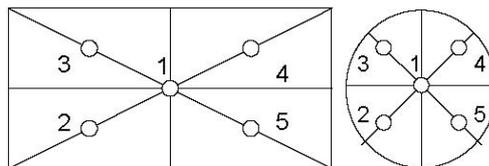
Las indicaciones  $I_{Lj}$  se registran para cada carga. Después de la retirada de cada carga, se debería comprobar que la indicación sea cero pudiendo ajustarse a cero si no lo es. Puede ser aconsejable registrar las indicaciones sin carga  $I_{0j}$  según el apartado 4.4.1.

### 5.3 Ensayo de excentricidad

El ensayo consiste en situar una carga de ensayo  $L_{ecc}$  en diferentes posiciones del receptor de carga de manera que el centro de gravedad de la carga ocupe las posiciones indicadas en la figura 5.3-1 o posiciones equivalentes, tan aproximadamente como sea posible.

**Fig. 5.3-1 Posiciones de carga en el ensayo de excentricidad**

1. Centro
2. Delante izquierda
3. Atrás izquierda
4. Atrás derecha
5. Delante derecha



Puede haber aplicaciones en las que no pueda situarse la carga de ensayo en el centro, o cerca del centro, del receptor de carga. En este caso, es suficiente situar la carga de ensayo en las restantes posiciones que indica la figura 5.3-1. Dependiendo de la forma del plato, puede variar el número de posiciones que no sea el centro, de la figura 5.3-1.

La carga de ensayo  $L_{ecc}$  debería ser del orden de  $Max/3$  o mayor, o  $Min' + (Max' - Min')/3$  o mayor en el caso de un rango de pesaje reducido.

Deben tomarse en consideración los consejos del fabricante, si están disponibles, y las limitaciones del diseño del instrumento que sean obvias. Véase, por ejemplo, el documento OIML R76 [2] (o EN 45501 [3]) para receptores de carga especiales.

Para instrumentos multi-rango [2] (o [3]) debería realizarse el ensayo únicamente en el rango con el mayor alcance indicado por el cliente (véase el apartado 4.1.1, 2º párrafo)

No es necesario que las cargas de ensayo estén calibradas ni verificadas, a no ser que los resultados sirvan para la determinación de los errores de indicación según el apartado 5.2.

El ensayo puede realizarse de diferentes formas:

1. Antes del ensayo se pone la indicación a cero. La carga de ensayo se sitúa primero en la posición 1 y luego se mueve a las otras 4 posiciones en un orden arbitrario. Se registran las indicaciones  $I_{Li}$  de cada posición de la carga.
2. Se pone la carga de ensayo en la posición 1, luego se tara el instrumento. A continuación, se mueve a las otras 4 posiciones en un orden arbitrario. Se registran las indicaciones  $I_{Li}$  de cada posición de la carga.
3. Antes del ensayo se pone la indicación a cero. La carga de ensayo se sitúa primero en la posición 1, se retira, se sitúa en la siguiente posición, se retira,..., hasta que se retira de la última posición. Se registran las indicaciones  $I_{Li}$  de cada posición de la carga. Después de retirar la carga en cada posición, debería verificarse la indicación y puede ponerse a cero en caso de no indicarlo. Puede ser aconsejable registrar las indicaciones sin carga  $I_{0i}$  según el apartado 4.4.1.
4. Se pone la carga de ensayo en la posición 1, luego se tara el instrumento. La carga de ensayo se mueve a la siguiente posición y a continuación a la posición 1 de nuevo, ..., se continúa el proceso hasta que se retira de la

última posición. Se registran las indicaciones del punto central  $I_{L1}$  aparte del resto de indicaciones descentradas  $I_{Li}$ .

Se sugieren los métodos 3 y 4 para instrumentos que muestren una deriva sustancial durante el ensayo de excentricidad.

En los métodos 2 y 4 deben desconectarse los dispositivos de puesta a cero o seguimiento de cero.

## 5.4 Mediciones auxiliares

Se recomiendan las siguientes mediciones (o registros) adicionales, particularmente, cuando se trata de realizar la calibración con la mínima incertidumbre posible.

Considerando los efectos de empuje del aire (véase el apartado 4.2.2):

Debería medirse la temperatura del aire en un lugar razonablemente próximo al instrumento, como mínimo una vez durante la calibración. Cuando un instrumento se utiliza en un ambiente controlado, debería anotarse el margen de variación de la temperatura, por ejemplo con un termógrafo, con un dispositivo de control, etc.

Puede ser útil considerar la presión atmosférica o, al menos, la altitud sobre el nivel del mar del lugar de calibración.

Considerando los efectos de la convección (véase el apartado 4.2.3):

Debería ponerse un especial cuidado en prevenir efectos de convección excesivos, observando un valor límite para la diferencia de temperatura entre los patrones de masa y el instrumento, y/o anotando que se ha cumplido con un periodo de aclimatación. Para comprobar la diferencia de temperatura puede ser útil un termómetro guardado en la caja con los patrones de masa.

Considerando los efectos de la interacción magnética:

Se recomienda, en los instrumentos de alta resolución, un ensayo para comprobar si hay un efecto observable de interacción magnética. Se pesa un patrón de masa junto con un separador de un material no metálico (por ejemplo madera, plástico), colocando el separador encima y debajo del patrón de masa para obtener dos indicaciones diferentes.

Si la diferencia entre las dos indicaciones es significativamente diferente de cero, debería mencionarse, como advertencia, en el certificado de calibración.

## 6 RESULTADOS DE MEDIDA

Los procedimientos y fórmulas de los apartados 6 y 7 proporcionan las bases para la evaluación de los resultados de los ensayos de calibración y, por tanto, no requieren una descripción mayor en un informe de ensayos. Si los procedimientos y fórmulas utilizados se desvían de los indicados en la guía, puede ser necesario proporcionar información adicional en el informe de ensayos.

No se pretende que se utilicen todas las fórmulas, símbolos e índices para presentar los resultados en un certificado de calibración.

En esta sección, se utiliza la definición de una indicación  $I$  dada en el apartado 4.4.

## 6.1 Repetibilidad

La desviación típica  $s_j$  se calcula a partir de las  $n$  indicaciones para una carga de ensayo dada  $L_{Tj}$ ,

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{ji} - \bar{I}_j)^2} \quad (6.1-1)$$

siendo

$$\bar{I}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{ji} \quad (6.1-2)$$

Cuando solamente se utilice una carga de ensayo, puede omitirse el índice  $j$ .

## 6.2 Errores de indicación

### 6.2.1 Valores discretos

Para cada carga de ensayo  $L_{Tj}$ , el error de indicación se calcula de la siguiente forma:

$$E_j = I_j - m_{\text{ref}j} \quad (6.2-1)$$

Cuando una indicación  $I_j$  es la media de más de una lectura, se entiende que  $I_j$  es el valor medio según (6.1-2).

El valor de masa de referencia  $m_{\text{ref}}$  podría aproximarse a su valor nominal  $m_{Nj}$

$$m_{\text{ref}j} = m_{Nj} \quad (6.2-2)$$

o, más exactamente, a su valor convencional real  $m_c$

$$m_{\text{ref}j} = m_{cj} = (m_{Nj} + \delta m_{cj}) \quad (6.2-3)$$

Cuando una carga de ensayo está compuesta por más de una masa,  $m_{Nj}$  se reemplaza por  $(\sum m_N)_j$  y  $\delta m_{cj}$  se reemplaza por  $(\sum \delta m_c)_j$  en la fórmula precedente.

Podrían aplicarse correcciones adicionales como las indicadas en (7.1.2-1).

### 6.2.2 Característica de un rango de pesaje

Además, o en lugar, de los valores discretos  $I_j$ ,  $E_j$ , puede determinarse para el rango de pesaje una corrección, o curva de calibración, que permita estimar el error de indicación para cualquier indicación  $I$  dentro del rango de pesaje.

Puede generarse una función

$$E = f(I) \quad (6.2-4)$$

mediante una aproximación adecuada, que debería, en general, basarse en el método de "mínimos cuadrados":

$$\sum v_j^2 = \sum (f(I_j) - E_j)^2 = \text{mínimo} \quad (6.2-5)$$

con

$v_j$  = residuo

$f$  = función de aproximación

La aproximación debería, además,

- tener en cuenta las incertidumbres  $u(E_j)$  de los errores,
- usar una función modelo que refleje las propiedades físicas del instrumento, por ejemplo, la forma de la relación entre la carga y su indicación  $I = g(L)$ ,
- incluir la comprobación de que los parámetros encontrados para la función modelo son matemáticamente consistentes con los datos reales.

Se supone que para cualquier  $m_{Nj}$ , el error  $E_j$  sigue siendo el mismo si se sustituye la indicación real  $I_j$  por su valor nominal  $I_{Nj}$ . Los cálculos para evaluar (6.2-5) pueden, por tanto, realizarse con los conjuntos de datos  $m_{Nj}$ ,  $E_j$ , o  $I_{Nj}$ ,  $E_j$ .

El Anexo C proporciona información sobre la selección de una ecuación de aproximación adecuada y los cálculos necesarios.

### 6.3 Efecto de la carga descentrada

A partir de las indicaciones  $I_i$  obtenidas en las diferentes posiciones de la carga según el apartado 5.3, se calculan las diferencias  $\Delta I_{\text{ecc}}$ .

Para el método 1 y 2, según el apartado 5.3

$$\Delta I_{\text{ecc}i} = I_{Li} - I_{L1} \quad (6.3-1)$$

Para el método 3, según el apartado 5.3

$$\Delta I_{\text{ecc}i} = (I_{Li} - I_{0i}) - I_{L1} \quad (6.3-2)$$

Para el método 4, según el apartado 5.3

$$\Delta I_{\text{eccí}} = I_{Li} - I_{Lli} \quad (6.3-3)$$

En el cálculo, se considera para cada indicación descentrada  $I_{Li}$ , la indicación en el centro correspondiente  $I_{Lli}$ .

## 7 INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

En esta sección y las siguientes, hay términos de incertidumbre que se asignan a correcciones pequeñas y que son proporcionales a un valor de masa especificado o a una indicación especificada. Para el cociente entre un valor de incertidumbre y el valor correspondiente del valor de masa o la indicación, se usará la notación abreviada  $u_{\text{rel}}$ .

Por ejemplo: sea

$$u(\delta m_{\text{corr}}) = m \cdot u(\text{corr}) \quad (7-1)$$

Con el término adimensional  $u(\text{corr})$ , entonces

$$u_{\text{rel}}(\delta m_{\text{corr}}) = u(\text{corr}) \quad (7-2)$$

De forma semejante, la varianza correspondiente se denotará por  $u_{\text{rel}}^2(\delta m_{\text{corr}})$  y la incertidumbre expandida relativa por  $U_{\text{rel}}(\delta m_{\text{corr}})$ .

Para la determinación de la incertidumbre, los términos de segundo orden se consideran despreciables, pero cuando las contribuciones de primer orden se cancelan, éstos deben considerarse (véase la referencia JCGM 101 [9], el apartado 9.3.2.6).

### 7.1 Incertidumbre típica de los valores discretos

La ecuación básica de la calibración es

$$E = I - m_{\text{ref}} \quad (7.1-1)$$

con las varianzas

$$u^2(E) = u^2(I) + u^2(m_{\text{ref}}) \quad (7.1-2)$$

Cuando se emplean cargas de sustitución (véase el apartado 4.3.3),  $m_{\text{ref}}$  se reemplaza por  $L_{Tn}$  o  $L_{Tn,k}$  en ambas ecuaciones.

Estos términos se explican a continuación.

#### 7.1.1 Incertidumbre típica de la indicación

Para tomar en consideración las fuentes de variabilidad de la indicación, se

modifica (4.4.1-1) con términos de corrección  $\delta I_{xx}$  de la siguiente forma:

$$I = I_L + \delta I_{\text{dig}L} + \delta I_{\text{rep}} + \delta I_{\text{ecc}} - I_0 - \delta I_{\text{dig}0} + \dots \quad (7.1.1-1)$$

Se pueden aplicar términos adicionales de corrección en condiciones especiales (efectos de temperatura, derivas, histéresis, ...) que no se consideran posteriormente.

Todas estas correcciones tienen esperanza matemática nula. Sus incertidumbres típicas son:

7.1.1.1  $\delta I_{\text{dig}0}$  se refiere al error de redondeo de la indicación a carga nula. Sus límites son  $\pm d_0/2$  o  $\pm d_T/2$  según corresponda y se les suponen distribuciones rectangulares, por lo que

$$u(\delta I_{\text{dig}0}) = d_0 / (2\sqrt{3}) \quad (7.1.1-2a)$$

o

$$u(\delta I_{\text{dig}0}) = d_T / (2\sqrt{3}) \quad (7.1.1-2b)$$

respectivamente.

Nota 1: véase el apartado 4.4.2 para el significado de  $d_T$ .

Nota 2: en un instrumento que tiene aprobación de tipo según el documento OIML R76 [2] (o EN 45501 [3]), el error de redondeo de una indicación de cero después de una operación de puesta a cero o de tara de la balanza está limitado por  $\pm d_0/4$ , por lo que

$$u(\delta I_{\text{dig}0}) = d_0 / (4\sqrt{3}) \quad (7.1.1-2c)$$

7.1.1.2  $\delta I_{\text{dig}L}$  se refiere al error de redondeo de la indicación con carga. Sus límites son  $\pm d_1/2$  o  $\pm d_T/2$  según corresponda y se les suponen distribuciones rectangulares, por lo que

$$u(\delta I_{\text{dig}L}) = d_1 / 2\sqrt{3} \quad (7.1.1-3a)$$

o

$$u(\delta I_{\text{dig}L}) = d_T / 2\sqrt{3} \quad (7.1.1-3b)$$

Nota: en un instrumento multi-escalón,  $d_I$  varía con  $I$ .

7.1.1.3  $\delta I_{\text{rep}}$  se refiere al error debido a la falta de repetibilidad; se le supone una distribución normal y se estima por

$$u(\delta I_{\text{rep}}) = s(I_j) \quad (7.1.1-5)$$

donde  $s(I_j)$  se determina según el apartado 6.1.

Si la indicación  $I$  proviene de una sola indicación y sólo se ha realizado un ensayo de repetibilidad, esta incertidumbre de falta de repetibilidad se puede considerar como representativa para todo el rango del instrumento.

Cuando la indicación  $I_j$  proviene de la media de  $N$  indicaciones realizadas con la misma carga de ensayo durante el ensayo de error de indicación, la incertidumbre típica correspondiente es

$$u(\delta I_{\text{rep}}) = s(I_j) / \sqrt{N} \quad (7.1.1-6)$$

Cuando se han determinado varios valores de  $s_j$  ( $s_j = s(I_j)$  en notación abreviada) a diferentes cargas de ensayo, se debería usar el valor máximo de las  $s_j$  para los dos puntos de ensayo que circunscriben la indicación cuyo error se determina.

Para instrumentos multi-escalón y multi-rango, cuando el ensayo de repetibilidad se ha realizado para más de un escalón/rango, la desviación típica para cada escalón/rango se puede considerar como representativo para todas las indicaciones del instrumento en el correspondiente escalón/rango.

Nota: Cuando se indica una desviación típica en un certificado de calibración, debería quedar claro si se refiere a una única indicación o a la media de  $N$  indicaciones.

7.1.1.4  $\delta I_{\text{ecc}}$  da cuenta del error debido a la posición descentrada del centro de gravedad de una carga de ensayo. Este efecto puede producirse cuando la carga de ensayo está formada por más de un cuerpo. Cuando no se puede despreciar el efecto, una estimación de su valor puede basarse en estas suposiciones:

- las diferencias  $\Delta I_{\text{ecc}}$  determinadas por (6.3-1) son proporcionales a la distancia de la carga al centro del receptor de carga,
- las diferencias  $\Delta I_{\text{ecc}}$  determinadas por (6.3-1) son proporcionales al valor de la carga,
- el centro de gravedad efectivo de las cargas de ensayo no está más desviado del centro del receptor de carga que la mitad de la distancia entre el centro del receptor de carga y las posiciones de las cargas de excentricidad, según se indica en la figura 5.3-1.

Basado en la mayor de las diferencias determinadas según el apartado 6.3,  $\delta I_{\text{ecc}}$  se estima que es

$$\delta I_{\text{ecc}} \leq \left\{ |\Delta I_{\text{ecc}i}|_{\text{max}} / (2L_{\text{ecc}}) \right\} I \quad (7.1.1-9)$$

Se supone una distribución rectangular, por lo que la desviación típica es

$$u(\delta I_{\text{ecc}}) = I |\Delta I_{\text{ecc}i}|_{\text{max}} / (2L_{\text{ecc}} \sqrt{3}) \quad (7.1.1-10)$$

o, en notación relativa

$$u_{\text{rel}}(\delta I_{\text{ecc}}) = |\Delta I_{\text{ecc}i}|_{\text{max}} / (2L_{\text{ecc}} \sqrt{3}) \quad (7.1.1-11)$$

7.1.1.5 La incertidumbre típica de la indicación se obtiene normalmente mediante

$$u^2(I) = d_0^2/12 + d_I^2/12 + u^2(\delta I_{\text{rep}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta I_{\text{ecc}})I^2 \quad (7.1.1-12)$$

Nota 1: la incertidumbre  $u(I)$  es constante, solamente, si  $s$  es constante y no es preciso considerar ningún error de descentramiento.

Nota 2: los primeros dos términos de la parte derecha de la ecuación pueden ser modificados en casos especiales según se menciona en los apartados 7.1.1.1 y 7.1.1.2.

### 7.1.2 Incertidumbre típica de la masa de referencia

A partir de los apartados 4.2.4 y 4.3.1 el valor de referencia de la masa es

$$m_{\text{ref}} = m_N + \delta m_c + \delta m_B + \delta m_D + \delta m_{\text{conv}} + \delta m_{\dots} \quad (7.1.2-1)$$

El último término representa correcciones posteriores que pueda ser necesario aplicar en condiciones especiales, pero que no se consideran en adelante.

Las correcciones y sus incertidumbres típicas son:

7.1.2.1  $\delta m_c$  es la corrección a  $m_N$  para obtener el valor de masa convencional  $m_c$ ; dada en el certificado de calibración de las pesas patrón, junto con la incertidumbre de calibración  $U$  y el factor de cobertura  $k$ . La incertidumbre típica es

$$u(\delta m_c) = U/k \quad (7.1.2-2)$$

Cuando la pesa patrón se ha calibrado respecto de unas tolerancias especificadas  $Tol$ , por ejemplo los  $emp$  indicados en el documento OIML R111 [4], y se utiliza su valor nominal  $m_N$ , entonces  $\delta m_c = 0$  y se supone una distribución rectangular, entonces

$$u(\delta m_c) = Tol/\sqrt{3} \quad (7.1.2-3)$$

Cuando una carga de ensayo está formada por más de una pesa patrón, las incertidumbres típicas se suman aritméticamente y no sus cuadrados, para tomar en consideración sus correlaciones supuestas.

Para cargas de ensayo formadas parcialmente por cargas de sustitución, véase el apartado 7.1.2.6.

7.1.2.2  $\delta m_B$  es la corrección por empuje del aire según se presentó en el apartado 4.2.4. Su valor depende de la densidad  $\rho$  de la pesa de calibración y del rango asumido de la densidad del aire  $\rho_a$  en el laboratorio

$$\delta m_B = -m_N(\rho_a - \rho_0)(1/\rho - 1/\rho_c) \quad (7.1.2-4)$$

con una incertidumbre típica relativa

$$u_{\text{rel}}^2(\delta m_B) = u^2(\rho_a)(1/\rho - 1/\rho_c)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho)/\rho^4 \quad (7.1.2-5a)^4$$

En la medida en que se conozcan los valores de  $\rho$ ,  $u(\rho)$ ,  $\rho_a$  y  $u(\rho_a)$ , deberían utilizarse para determinar  $u_{\text{rel}}(\delta m_B)$ .

La densidad  $\rho$  y su incertidumbre típica pueden estimarse, en ausencia de dicha información, según el estado de la técnica o en base a información suministrada por el fabricante. El anexo E1 da valores reconocidos internacionalmente para materiales utilizados normalmente en pesas patrón.

La densidad del aire  $\rho_a$  y su incertidumbre típica se pueden calcular a partir de la temperatura y la presión atmosférica, si están disponibles (la humedad relativa tiene una influencia menor), o puede estimarse a partir de la altitud sobre el nivel del mar.

Cuando se establece la conformidad de las pesas patrón con el documento OIML R111 [4] y no se dispone a mano de información sobre  $\rho$  y  $\rho_a$ , se puede recurrir a la sección 10 del documento OIML R111<sup>5</sup>. No se aplica corrección y las incertidumbres relativas son:

Si el instrumento se ajusta inmediatamente antes de la calibración

$$u_{\text{rel}}(\delta m_B) \approx emp/(4m_N \sqrt{3}) \quad (7.1.2-5c)$$

Si el instrumento no se ajusta antes de la calibración

$$u_{\text{rel}}(\delta m_B) \approx (0,1\rho_0/\rho_c + emp/(4m_N))/\sqrt{3} \quad (7.1.2-5d)$$

Si se puede asumir alguna información para la variación de temperatura en la ubicación del instrumento, la ecuación (7.1.2-5d) se puede sustituir por

$$u_{\text{rel}}(\delta m_B) \approx \sqrt{1,07 \times 10^{-4} + 1,33 \times 10^{-6} \text{K}^{-2} \Delta T^2} \cdot \rho_0/\rho_c + emp/(4m_N \sqrt{3}) \quad (7.1.2-5e)$$

donde  $\Delta T$  es la variación máxima de la temperatura ambiente que puede ser supuesta para la ubicación (véanse los anexos A2.2 y A3 para más detalles).

A partir de los requisitos de la nota a pie de página 5, pueden derivarse los

<sup>4</sup> Una fórmula más exacta que la de (7.1.2-5a) podría ser [10]

$$u_{\text{rel}}^2(\delta m_B) = u^2(\rho_a)(1/\rho - 1/\rho_c)^2 + (\rho_a - \rho_0)[(\rho_a - \rho_0) - 2(\rho_{a1} - \rho_0)]u^2(\rho)/\rho^4 \quad (7.1.2-5b)$$

donde  $\rho_{a1}$  es la densidad del aire durante la calibración de las pesas patrón. Esta fórmula es útil cuando el instrumento está situado a una altitud por encima del nivel del mar, si no fuese así la incertidumbre podría ser sobreestimada.

<sup>5</sup> La densidad del material empleado en las pesas debe ser tal que una desviación del 10 % respecto a la densidad del aire especificada (1.2 kg/m<sup>3</sup>) no produzca un error que exceda un cuarto del error máximo permitido.

límites para los valores  $\rho$ . Por ejemplo, para clase E<sub>2</sub>:  $|\rho - \rho_c| \leq 200 \text{ kg/m}^3$  y para la clase F<sub>1</sub>:  $|\rho - \rho_c| \leq 600 \text{ kg/m}^3$ .

Nota: Debido al hecho que la densidad de los materiales usados para las pesas patrón es normalmente más cercana a  $\rho_c$  que lo indicado por los límites de la OIML R111, las últimas 3 ecuaciones pueden considerarse como límites superiores para  $u_{\text{rel}}(\delta m_B)$ . Cuando la simple comparación de estos valores con la resolución del instrumento ( $d / \text{Max}$ ) muestra que son suficientemente pequeños, puede ser innecesario un cálculo más elaborado de esta componente de la incertidumbre, basada en datos reales.

7.1.2.3  $\delta m_D$  corresponde a la posible deriva de  $m_c$  desde la última calibración. La mejor manera de suponer un valor límite  $D$ , es basarse en la diferencia en  $m_c$  puesta de manifiesto en los certificados de calibración consecutivos de las pesas patrón.

$D$  puede estimarse considerando la calidad de las pesas y la frecuencia y cuidado en su uso, como al menos un múltiplo de su incertidumbre expandida  $U(\delta m_c)$

$$D = k_D U(\delta m_c) \quad (7.1.2-10)$$

donde  $k_D$  es un valor elegido entre 1 y 3.

En ausencia de información sobre la deriva, el valor de  $D$  será elegido como el *emp* según el documento OIML R 111 [4].

No se aconseja aplicar una corrección sino suponer una distribución uniforme entre  $\pm D$  (distribución rectangular). La incertidumbre típica es entonces

$$u(\delta m_D) = D / \sqrt{3} \quad (7.1.2-11)$$

Cuando se ha calibrado un conjunto de pesas con una incertidumbre expandida relativa normalizada  $U_{\text{rel}}(\delta m_c)$ , puede ser conveniente introducir un valor límite relativo para la deriva  $D_{\text{rel}} = D / m_N$  y una incertidumbre relativa para la deriva

$$u_{\text{rel}}(\delta m_D) = D_{\text{rel}} / \sqrt{3} \quad (7.1.2-12)$$

7.1.2.4  $\delta m_{\text{conv}}$  corresponde a los efectos de convección según el apartado 4.2.3. Puede adoptarse un valor límite  $\Delta m_{\text{conv}}$  del anexo F, en función de una diferencia conocida de temperatura  $\Delta T$  y de la masa de la pesa patrón.

No se aconseja aplicar una corrección sino suponer una distribución uniforme entre  $\pm \Delta m_{\text{conv}}$ . La incertidumbre típica es entonces

$$u(\delta m_{\text{conv}}) = \Delta m_{\text{conv}} / \sqrt{3} \quad (7.1.2-13)$$

Este efecto es solamente relevante para pesas de clase F<sub>1</sub> o mejor.

7.1.2.5 La incertidumbre típica de la masa de referencia se obtiene de la ecuación del apartado 7.1.2

$$u^2(m_{\text{ref}}) = u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D) + u^2(\delta m_{\text{conv}}) \quad (7.1.2-14)$$

con las contribuciones indicadas de 7.1.2.1 a 7.1.2.4.

7.1.2.6 Cuando una carga de ensayo está formada parcialmente por cargas de sustitución según el apartado 4.3.3 y las cargas de ensayo se definen según (4.3.3-5a), la incertidumbre típica para la suma  $L_{Tn} = nm_{\text{ref}} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \dots + \Delta I_{n-1}$  viene dada por la siguiente expresión

$$u^2(L_{Tn}) = n^2 u^2(m_{\text{ref}}) + 2[u^2(I_1) + u^2(I_2) + \dots + u^2(I_{n-1})] \quad (7.1.2-15a)$$

con  $u(m_{\text{ref}})$  de 7.1.2.5 y  $u(I_j)$  del apartado 7.1.1.5 para  $I = I(L_{Tj})$

Cuando una carga de ensayo está formada parcialmente por cargas de sustitución según el apartado 4.3.3 y las cargas de ensayo se definen según (4.3.3-5b), la incertidumbre típica para la suma

$$L_{Tn,k} = (n-1)m_{\text{ref}} + m_{\text{ref},k} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \dots + \Delta I_{n-1}$$

viene dada por la expresión siguiente

$$u^2(L_{Tn,k}) = [(n-1)u(m_{\text{ref}}) + u(m_{\text{ref},k})]^2 + 2[u^2(I_1) + u^2(I_2) + \dots + u^2(I_{n-1})] \quad (7.1.2-15b)$$

con  $u(m_{\text{ref}})$  del apartado 7.1.2.5 y  $u(I_j)$  del apartado 7.1.1.5 para  $I = I(L_{Tj})$

Nota: Las incertidumbres  $u(I_j)$  deben incluirse también para las indicaciones en las que la carga de sustitución se ha ajustado de manera que la  $\Delta I$  correspondiente sea cero.

Dependiendo del tipo de carga de sustitución puede ser necesario añadir más contribuciones de incertidumbre.

- Por carga descentrada según el apartado 7.1.1.4 a algunas o todas las indicaciones reales  $I(L_{Tj})$ .
- Por empuje del aire sobre las cargas de sustitución, cuando se han formado con materiales de baja densidad (por ejemplo, arena o grava) y la densidad del aire varía significativamente durante el tiempo de uso de las cargas de sustitución.

Cuando  $u(I_j) = \text{const}$ , la expresión (7.1.2-15a) se simplifica a

$$u^2(L_{Tn}) = n^2 u^2(m_{\text{ref}}) + 2[(n-1)u^2(I)] \quad (7.1.2-16a)$$

y la expresión (7.1.2-15b) se simplifica a

$$u^2(L_{Tn,k}) = [(n-1)u(m_{ref}) + u(m_{ref,k})]^2 + 2[(n-1)u^2(I)] \quad (7.1.2-16b)$$

### 7.1.3 Incertidumbre típica del error

La incertidumbre típica del error se calcula, con los términos adecuados de los apartados 7.1.1 y 7.1.2, mediante

$$u^2(E) = u^2(\delta I_{dig0}) + u^2(\delta I_{digI}) + u^2(\delta I_{rep}) + u^2(\delta I_{ecc}) + u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D) + u^2(\delta m_{conv}) \quad (7.1.3-1a)$$

o, cuando se utilizan incertidumbres relativas, mediante

$$u^2(E) = u^2(\delta I_{dig0}) + u^2(\delta I_{digI}) + u^2(\delta I_{rep}) + u_{rel}^2(\delta I_{ecc})I^2 + \{u_{rel}^2(\delta m_c) + u_{rel}^2(\delta m_B) + u_{rel}^2(\delta m_D)\}m_{ref}^2 + u^2(\delta m_{conv}) \quad (7.1.3-1b)$$

En caso de utilizar cargas de sustitución

$$u^2(E_{n,k}) = u^2(\delta I_{dig0}) + u^2(\delta I_{digI}) + u^2(\delta I_{rep}) + u^2(\delta I_{ecc}) + u^2(L_{Tn,k}) \quad (7.1.3-1c)$$

donde  $n$  está relacionada con el número de sustituciones y  $k$  es el número de pesas patrón.

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

Se ha omitido el índice "j".

Considerando que la experiencia general es que los errores son normalmente muy pequeños comparados con la indicación, o incluso iguales a cero, en (7.1.3-1b) los valores para  $m_{ref}$  e  $I$  pueden reemplazarse por  $I_N$ .

Los términos de (7.1.3-1b) pueden agruparse entonces en una ecuación simple que refleja mejor el hecho de que alguno de los términos son absolutos por naturaleza, mientras que otros son proporcionales a la indicación

$$u^2(E) = \alpha^2 + \beta^2 I^2 \quad (7.1.3-2)$$

## 7.2 Incertidumbre típica de una característica

Cuando se realiza una aproximación para obtener una ecuación  $E = f(I)$  para todo el campo de pesaje según el apartado 6.2.2, la incertidumbre típica del error según el apartado 7.1.3 debe corregirse para ser consistente con el método de aproximación. Según la función modelo, ésta puede ser

- una única varianza que se añade a (7.1.3-1), o
- un conjunto de varianzas y covarianzas que incluye la varianza de (7.1.3-1).

Los cálculos deben incluir también una comprobación de que la función modelo es coherente matemáticamente con los conjuntos de datos  $E_j, I_j, u(E_j)$ .

Se propone para las aproximaciones el método de mínima  $\chi^2$ , que es similar al método de mínimos cuadrados. Se proporcionan detalles en el anexo C.

### 7.3 Incertidumbre expandida en la calibración

La incertidumbre expandida del error es

$$U(E) = k u(E) \quad (7.3-1)$$

El factor de cobertura  $k$  debería escogerse de manera que la incertidumbre expandida corresponda a una probabilidad de cobertura de 95,45 %.

Información adicional sobre cómo derivar el factor de cobertura se proporciona en el anexo B.

### 7.4 Incertidumbre típica del resultado de una pesada

Los apartados 7.4 y 7.5 proporcionan recomendaciones sobre cómo la incertidumbre de medida de un instrumento se puede estimar en su utilización normal, tomando en consideración la incertidumbre de medida en la calibración. Cuando un laboratorio de calibración ofrece a sus clientes tales estimaciones que se basan en información que no ha sido medida por el laboratorio, las estimaciones no se deben presentar como parte del certificado de calibración. Sin embargo, es aceptable proporcionar tales estimaciones siempre que estén claramente separadas de los resultados de la calibración.

El usuario de un instrumento debería ser consciente del hecho de que en uso normal, la situación es diferente a aquella durante la calibración, no sólo en algunos sino en todos estos aspectos:

1. las indicaciones para los objetos pesados no son las de la calibración,
2. el proceso de pesaje puede ser diferente del procedimiento de calibración:
  - a. generalmente sólo se toma una lectura para cada carga, no se toman varias lecturas para obtener un valor medio,
  - b. lectura con un escalón  $d$  del instrumento, no con resolución mayor,
  - c. el proceso de carga es creciente y decreciente, no solamente creciente o viceversa,
  - d. la carga puede mantenerse en el receptor de carga durante un largo tiempo, no descargando después de cada carga o viceversa,
  - e. aplicación descentrada de la carga,
  - f. uso del dispositivo de tara, etc.
3. el entorno (temperatura, presión atmosférica, etc.) puede ser diferente,
4. para el caso de instrumentos que no se reajustan regularmente, por ejemplo mediante un dispositivo incorporado, puede haber cambiado el

ajuste, debido al envejecimiento o al desgaste.

A diferencia de los ítems 1 a 3, este efecto debería, por lo tanto, considerarse en relación a un cierto periodo de tiempo, por ejemplo, para un año o el intervalo normal entre calibraciones,

5. la repetibilidad del ajuste.

Para distinguir claramente entre la indicación  $I$  de un instrumento obtenida durante su calibración y un resultado de pesada obtenido cuando se pesa una carga  $L$  en el instrumento calibrado, se introducen estos términos y símbolos:

- $R_L$  = lectura obtenida después de la calibración, cuando se pesa una carga  $L$  en el instrumento calibrado.
- $R_0$  = lectura obtenida después de la calibración, sin carga en el instrumento calibrado.

Las lecturas se toman únicas con resolución normal (múltiplo del escalón  $d$ ), con correcciones que se aplicarán según proceda.

Para una lectura tomada bajo las mismas condiciones que las habidas en la calibración, el resultado puede ser denominado como resultado de pesada bajo las condiciones de calibración  $W^*$

$$W^* = R_L + \delta R_{\text{dig}L} + \delta R_{\text{rep}} + \delta R_{\text{ecc}} - (R_0 + \delta R_{\text{dig}0}) - E \quad (7.4-1a)$$

Con la incertidumbre asociada

$$u(W^*) = \sqrt{\{u^2(E) + u^2(\delta R_{\text{dig}0}) + u^2(\delta R_{\text{dig}L}) + u^2(\delta R_{\text{rep}}) + u^2(\delta R_{\text{ecc}})\}} \quad (7.4-2a)$$

Para tener en cuenta las restantes posibles influencias en el resultado de la pesada, se añaden formalmente más correcciones a la lectura de forma generalizada obteniéndose el resultado general de la pesada

$$W = W^* + \delta R_{\text{instr}} + \delta R_{\text{proc}} \quad (7.4-1b)$$

donde  $\delta R_{\text{instr}}$  representa un término de corrección debido a las influencias ambientales y  $\delta R_{\text{proc}}$  representa un término de corrección debido al funcionamiento del instrumento.

La incertidumbre asociada es

$$u(W) = \sqrt{u^2(W^*) + u^2(\delta R_{\text{instr}}) + u^2(\delta R_{\text{proc}})} \quad (7.4-2b)$$

Los términos añadidos y las correspondientes incertidumbres típicas se discuten en los apartados 7.4.3 y 7.4.4. Las incertidumbres típicas  $u(W^*)$  y  $u(W)$  se presentan finalmente en el apartado 7.4.5.

Los apartados 7.4.3, 7.4.4, 7.4.5 y 7.5 se indican como recomendaciones para el usuario del instrumento acerca de cómo estimar la incertidumbre de los resultados de pesaje obtenidos bajo sus condiciones normales de uso. No

pretenden ser exhaustivas ni obligatorias.

#### 7.4.1 Incertidumbre típica de la lectura en uso

Para tener en cuenta las fuentes de variabilidad de las lecturas, se aplica (7.1.1-1), reemplazando  $I$  por  $R$

$$R = R_L + \delta R_{\text{dig}L} + \delta R_{\text{rep}} + \delta R_{\text{ecc}} - (R_0 + \delta R_{\text{dig}0}) \dots \quad (7.4.1-1)$$

Las correcciones y sus incertidumbres típicas son:

7.4.1.1  $\delta R_{\text{dig}0}$  se refiere al error de redondeo a lectura cero. Se aplica el apartado 7.1.1.1 con la excepción de que se excluye la variante  $d_T < d$ , por lo que

$$u(\delta R_{\text{dig}0}) = d_0 / \sqrt{12} \quad (7.4.1-2)$$

7.4.1.2  $\delta R_{\text{dig}L}$  se refiere al error de redondeo a lectura con carga. Se aplica el apartado 7.1.1.2 con la excepción de que se excluye la variante  $d_T < d_L$ , por lo que

$$u(\delta R_{\text{dig}L}) = d_L / \sqrt{12} \quad (7.4.1-3)$$

7.4.1.3  $\delta R_{\text{rep}}$  se refiere al error debido a la imperfección de repetibilidad del instrumento. Se aplica el apartado 7.1.1.3, obteniendo del certificado de calibración la desviación típica correspondiente  $s$  de una única lectura, por lo que

$$u(\delta R_{\text{rep}}) = s \text{ o } u(\delta R_{\text{rep}}) = s(R) \quad (7.4.1-4)$$

Nota: Debería utilizarse la desviación típica para el cálculo de incertidumbre en vez de la desviación típica de la media.

7.4.1.4  $\delta R_{\text{ecc}}$  se refiere al error debido a la posición descentrada del centro de gravedad de la carga.

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = |\Delta I_{\text{ecc}i}|_{\text{max}} / (2L_{\text{ecc}} \sqrt{3}) \quad (7.4.1-5)$$

7.4.1.5 La incertidumbre típica de la lectura se obtiene entonces mediante

$$u^2(R) = d_0^2/12 + d_L^2/12 + s^2(R) + \left( |\Delta I_{\text{ecc}i}|_{\text{max}} / (2L_{\text{ecc}} \sqrt{3}) \right)^2 R^2 \dots \quad (7.4.1-6)$$

#### 7.4.2 Incertidumbre del error de una lectura

Cuando una lectura  $R$  corresponde a una indicación  $I_{\text{calj}}$  reflejada en el certificado de calibración,  $u(E_{\text{calj}})$  puede obtenerse del mismo. Para las otras lecturas,  $u(E)$  puede calcularse mediante (7.1.3-2) si se conocen  $\alpha$  y  $\beta$ , o si

se obtiene por interpolación, o mediante una ecuación de aproximación según el apartado 7.2.

La incertidumbre  $u(E)$  normalmente no es más pequeña que  $u(E_{calj})$  para una indicación  $I_j$  que está cercana a la lectura real  $R$ , a no ser que se haya determinado mediante una fórmula de aproximación.

Nota: el certificado de calibración, normalmente, presenta  $U_{95}(E_{cal})$  a partir de la cual se calcula  $u(E_{cal})$  dividiendo  $U_{95}(E_{cal})$  por el factor de cobertura  $k$  establecido en el certificado.

### 7.4.3 Incertidumbre debida a influencias ambientales

El término  $\delta R_{instr}$  se refiere a 3 efectos  $\delta R_{temp}$ ,  $\delta R_{buoy}$  y  $\delta R_{adj}$ , que se tratan a continuación. Excepto para la contribución debida al empuje del aire, no se aplican normalmente a instrumentos que se ajustan justo antes de ser utilizados. Para otros instrumentos deben considerarse en la medida que sean aplicables. No se aplican correcciones y las correspondientes incertidumbres se estiman tomando en consideración el conocimiento de los usuarios sobre las propiedades del instrumento.

7.4.3.1 El término  $\delta R_{temp}$  se refiere al cambio de la curva característica del instrumento causado por una variación de la temperatura ambiente. Se puede estimar un valor límite para  $\delta R_{temp} = K_T \Delta T R$  donde  $\Delta T$  es la variación máxima de temperatura en la ubicación del instrumento y  $K_T$  es la sensibilidad del instrumento a la variación de temperatura. Cuando la balanza tiene un dispositivo automático de ajuste mediante pesas internas asociado a una diferencia de temperatura, entonces  $\Delta T$  puede tomarse como esa diferencia de temperatura.

Normalmente, hay una especificación del fabricante tal como  $K_T = [\partial I(Max) / \partial T] / Max$ , en muchos casos dada en  $10^{-6}/K$ . Por defecto, para los instrumentos con aprobación de tipo según el documento OIML R76 [2] (o EN 45501 [3]), puede suponerse que  $|K_T| \leq emp(Max) / (Max \Delta T_{Approval})$  donde  $\Delta T_{Approval}$  es el intervalo de temperatura para la aprobación, marcado en el instrumento; para otros instrumentos, o bien se realiza una suposición conservadora, llevando a un múltiplo (de 3 a 10 veces) del valor comparable para instrumentos con aprobación de tipo, o no puede darse ninguna información para el uso del instrumento en otras temperaturas diferentes a la de calibración.

El intervalo de variación de la temperatura  $\Delta T$  (ancho total) debería estimarse considerando el emplazamiento donde el instrumento se está usando, según se trata en el anexo A2.2.

Se supone una distribución rectangular, por lo que la incertidumbre relativa es

$$u_{rel}(\delta R_{temp}) = K_T \Delta T / \sqrt{12} \quad (7.4.3-1)$$

7.4.3.2 El término  $\delta R_{buoy}$  se refiere al cambio en el ajuste del instrumento debido a la variación de la densidad del aire; no se aplica corrección.

Cuando la balanza se ajusta inmediatamente antes de utilizarla y pueden hacerse algunas suposiciones por la variación en la densidad del aire respecto al valor durante la calibración,  $\Delta\rho_a$ , la contribución de la incertidumbre puede ser [10]

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{bouy}}) = \frac{\Delta\rho_a}{\rho_c^2} u(\rho_s) \quad (7.4.3-2)$$

donde  $u(\rho_s)$  es la incertidumbre de la densidad de la pesa de referencia utilizada para el ajuste (pesa interna o externa).

Cuando la balanza no se ajusta antes de su uso y pueden hacerse algunas suposiciones por la variación en densidad,  $\Delta\rho_a$ , la contribución de la incertidumbre puede ser

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{bouy}}) = \frac{\Delta\rho_a}{\rho_c \sqrt{3}} \quad (7.4.3-3)$$

Si se pueden hacer algunas suposiciones para la variación de temperatura en la ubicación de la balanza, la ecuación (7.4.3-3) se puede aproximar por

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{bouy}}) = \frac{\sqrt{1,07 \times 10^{-4} + 1,33 \times 10^{-6} \text{K}^{-2} \Delta T^2} \cdot \rho_0}{\rho_c} \quad (7.4.3-4)$$

donde  $\Delta T$  es la variación máxima supuesta para la temperatura en la ubicación de la balanza (véanse los anexos A2.2 y A3 para más detalle).

Si no se pueden hacer suposiciones en relación con la variación de la densidad, el enfoque más conservador sería

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{bouy}}) = \frac{0,1\rho_0}{\rho_c \sqrt{3}} \quad (7.4.3-5)$$

7.4.3.3 El término  $\delta R_{\text{adj}}$  se refiere al cambio en la curva característica del instrumento desde el momento de la calibración debido a la deriva, al envejecimiento o al desgaste.

Puede tomarse un valor límite a partir de calibraciones anteriores, si existen, como la mayor diferencia  $|\Delta E(\text{Max})|$  de los errores en o cercano a  $\text{Max}$  entre dos calibraciones cualquiera consecutivas. Por defecto,  $\Delta E(\text{Max})$  debería tomarse de las especificaciones del fabricante del instrumento, o puede estimarse como  $\Delta E(\text{Max}) = \text{emp}(\text{Max})$  para instrumentos conformes a una aprobación de tipo según el documento OIML R76 [2] (o EN 45501 [3]). Puede considerarse cualquiera de estos valores según el intervalo de tiempo estimado entre calibraciones, suponiendo una variación aproximadamente lineal del cambio con el tiempo.

Se supone una distribución rectangular, por lo que la incertidumbre relativa es

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{adj}}) = |\Delta E(\text{Max})| / (\text{Max} \sqrt{3}) \quad (7.4.3-6)$$

7.4.3.4 La incertidumbre típica relativa correspondiente a los errores que resultan de los efectos ambientales se calcula mediante

$$u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{instr}}) = u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{temp}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{buoy}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{adj}}) \quad (7.4.3-7)$$

#### 7.4.4 Incertidumbre originada por el manejo del instrumento

El término de corrección  $\delta R_{\text{proc}}$  se refiere a los errores adicionales ( $\delta R_{\text{Tare}}$ ,  $\delta R_{\text{time}}$  y  $\delta R_{\text{ecc}}$ ) que pueden ocurrir cuando el (los) procedimiento(s) de pesaje es (son) diferente(s) de aquellos usados en la calibración. No se realizan correcciones, pero se estiman las incertidumbres correspondientes basadas en el conocimiento que el usuario tiene de las propiedades del instrumento.

7.4.4.1 El término  $\delta R_{\text{Tare}}$  se refiere al resultado de pesada neta después de una operación de tara [2] o [3]. El posible error y la incertidumbre que se le asocia deberían estimarse considerando la relación básica entre las lecturas implicadas

$$R_{\text{Net}} = R'_{\text{Gross}} - R'_{\text{Tare}} \quad (7.4.4-1)$$

donde las  $R'$  son lecturas ficticias que se procesan en el interior del instrumento, mientras que la indicación visible  $R_{\text{Net}}$  se obtiene directamente, después de poner la indicación del instrumento a cero con la carga de tara en el receptor de carga. El resultado de pesaje en este caso, es teóricamente

$$W_{\text{Net}} = R_{\text{Net}} - [E(\text{Gross}) - E(\text{Tare})] + \delta R_{\text{instr}} + \delta R_{\text{proc}} \quad (7.4.4-2)$$

consistente con (7.4-1). Los errores en bruto y en tara deberían tomarse como errores para los valores equivalentes  $R$  según lo indicado. Sin embargo, los valores de tara (y consecuentemente, los valores de bruto) no se anotan normalmente.

El error puede estimarse entonces como

$$E_{\text{Net}} = E(\text{Net}) + \delta R_{\text{Tare}} \quad (7.4.4-3)$$

donde  $E(\text{Net})$  es el error para una lectura  $R_{\text{Net}}$  y  $\delta R_{\text{Tare}}$  es una corrección adicional para el efecto de no linealidad de la curva de error  $E_{\text{cal}}(I)$ . Para cuantificar la no linealidad puede utilizarse la primera derivada de la función  $E = f(R)$ , si se conoce, o se puede calcular la pendiente  $q_E$  entre puntos consecutivos de calibración mediante

$$q_E = \frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{E_{j+1} - E_j}{I_{j+1} - I_j} \quad (7.4.4-4)$$

Los valores máximo y mínimo de las derivadas o de los cocientes se toman como valores límites para la corrección  $\delta R_{\text{Tare}}$ , para la que puede suponerse una

distribución rectangular. Como resultado, la incertidumbre típica relativa es

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{Tare}}) = (q_{E_{\text{max}}} - q_{E_{\text{min}}}) / \sqrt{12} \quad (7.4.4-5)$$

Para estimar la incertidumbre  $u(W)$ , se considera  $R = R_{\text{Net}}$ . Para  $u(E)$  está justificada la suposición  $u(E(\text{Net})) = u(E(R = \text{Net}))$  debido a que existe una correlación total entre las magnitudes que contribuyen a las incertidumbres de los errores de las lecturas ficticias de bruto y tara.

7.4.4.2 El término  $\delta R_{\text{time}}$  se refiere a los posibles efectos de la deriva bajo carga y la histéresis en situaciones como las siguientes:

- a) El proceso de carga durante la calibración fue continuamente ascendente o continuamente creciente y decreciente (método 2 ó 3 del apartado 5.2), de manera que la carga permaneció en el receptor de carga durante un cierto periodo de tiempo, esto es bastante significativo cuando se ha utilizado el método de sustitución, usualmente en instrumentos de gran capacidad. Cuando en el uso normal, la carga discreta a pesar se pone en el receptor de carga y se mantiene en él solamente el tiempo necesario para obtener una lectura o una impresión, el error de indicación puede diferir del obtenido para la misma carga durante la calibración.

Cuando los ensayos se realizan de forma continua creciente y decreciente, la diferencia máxima de los errores  $\Delta E_j$  para cualquier carga de ensayo  $m_j$  se puede tomar como el valor límite para este efecto, lo que conduce a una incertidumbre típica relativa

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{time}}) = \Delta E_{j_{\text{max}}} / (m_j \sqrt{12}) \quad (7.4.4-6)$$

Cuando los ensayos se realizan solamente en sentido creciente, puede utilizarse el error de retorno a cero  $E_0$ , si se determina, para estimar una incertidumbre típica relativa

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{time}}) = E_0 / (Max \sqrt{3}) \quad (7.4.4-7)$$

En ausencia de estas informaciones, el valor límite puede estimarse, para instrumentos con aprobación de tipo según el documento OIML R76 [2] (o EN 45501 [3]) como

$$\Delta E(R) = R \text{ emp}(Max) / Max \quad (7.4.4-8)$$

Para instrumentos sin dicha aprobación de tipo, una estimación conservadora sería un múltiplo ( $m = 3$  a 10 veces) de este valor.

La incertidumbre típica relativa es

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{time}}) = \text{emp}(Max) / (Max \sqrt{3}), \quad (7.4.4-9a)$$

para instrumentos con aprobación de tipo y

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{time}}) = m \text{ emp}(Max) / (Max \sqrt{3}) \quad (7.4.4-9b)$$

para instrumentos sin aprobación de tipo.

- b) El proceso de carga durante la calibración se realizó con descarga entre cada escalón de carga, mientras que las cargas a pesar en un uso normal se mantienen en el receptor de carga durante un tiempo mayor. En ausencia de otras informaciones, por ejemplo, observación del cambio de indicación durante un periodo de tiempo típico, puede recurrirse a (7.4.4-9) según sea aplicable.
- c) El proceso de carga se realizó solamente en sentido creciente mientras que la pesada en uso se realiza en sentido decreciente. Esta situación puede considerarse como la inversa de la operación de tara (véase el apartado 7.4.4.1) combinado con el punto b) anterior. Son aplicables (7.4.4-5) y (7.4.4-9).

Nota: En caso de pesada en sentido decreciente, la lectura  $R$  debe tomarse como un valor positivo aunque se indique como negativa por el instrumento de pesaje.

7.4.4.3  $\delta R_{\text{ecc}}$  se refiere al error debido al descentramiento del centro de gravedad de una carga. La ecuación (7.4.1-5) es aplicable con la modificación de considerar íntegramente el efecto encontrado en la calibración, por lo que

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = |\Delta I_{\text{ecc}}|_{\text{max}} / (L_{\text{ecc}} \sqrt{3}) \quad (7.4.4-10)$$

#### 7.4.5 Incertidumbre típica del resultado de una pesada

La incertidumbre típica del resultado de una pesada se calcula a partir de los términos especificados en los apartados 7.4.1 a 7.4.4, según apliquen.

Para los resultados de pesada bajo las condiciones de calibración

$$u^2(W^*) = d_0^2/12 + d_L^2/12 + s^2(R) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{ecc}})R^2 + u^2(E) \quad (7.4.5-1a)$$

Para los resultados de pesada en general

$$u^2(W) = u^2(W^*) + \left[ u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{temp}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{bouy}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{adj}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{Tare}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{time}}) \right] R^2 \quad (7.4.5-1b)$$

La mayoría de las contribuciones a  $u(W)$  se pueden agrupar en dos términos  $\alpha_W^2$  y  $\beta_W^2$

$$u^2(W) = \alpha_W^2 + \beta_W^2 R^2 \quad (7.4.5-2)$$

donde  $\alpha_W^2$  es la suma de los cuadrados de todas las incertidumbres típicas absolutas y  $\beta_W^2$  es la suma de los cuadrados de todas las incertidumbres típicas relativas.

## 7.5 Incertidumbre expandida del resultado de una pesada

### 7.5.1 Errores considerados en la corrección

La ecuación completa para un resultado de pesada es igual a la lectura corregida del error determinado en la calibración

$$W^* = R - E(R) \pm U(W^*) \quad (7.5.1-1a)$$

o

$$W = R - E(R) \pm U(W) \quad (7.5.1-1b)$$

según sea aplicable.

La incertidumbre expandida  $U(W)$  se determina como

$$U(W^*) = k u(W^*) \quad (7.5.1-2a)$$

o

$$U(W) = k u(W) \quad (7.5.1-2b)$$

con  $u(W^*)$  o  $u(W)$  según sea aplicable, según el apartado 7.4.5.

Para  $U(W^*)$ , el factor de cobertura  $k$  se debería determinar según el apartado 7.3.

Para  $U(W)$ , el factor de cobertura  $k$  será, en la mayoría de los casos igual a 2, aún cuando la desviación típica  $s$  se obtenga a partir de unas pocas medidas, y/o cuando se declare  $k_{cal} > 2$  en el certificado de calibración. Esto se debe al gran número de términos que contribuyen a  $u(W)$ .

### 7.5.2 Errores incluidos en la incertidumbre

Puede haberse acordado entre el laboratorio de calibración y el cliente que se aporte una "incertidumbre global"  $U_{gl}(W)$  que incluya los errores de indicación de manera que no sea necesario aplicar correcciones a las lecturas en uso

$$W = R \pm U_{gl}(W) \quad (7.5.2-1)$$

A menos que los errores estén más o menos centrados alrededor del cero, forman una contribución unilateral a la incertidumbre que solamente pueda tratarse de una manera aproximada. Por razones de simplicidad y conveniencia, es mejor declarar la "incertidumbre global" como una función para todo el rango de pesaje, en lugar de como valores individuales para valores fijos del resultado de pesada.

Sea  $E(R)$  una función, o sea  $E^0$  un valor representativo de todos los errores declarados en el rango de pesaje en el certificado de calibración. La combinación con las incertidumbres de uso puede tomar, en principio, una de estas formas

$$U_{gl}(W) = k\sqrt{u^2(W) + (E(R))^2} \quad (7.5.2-2a)$$

$$U_{gl}(W) = k\sqrt{u^2(W) + (E^0)^2} \quad (7.5.2-2b)$$

$$U_{gl}(W) = k\sqrt{u^2(W) + (E^0)^2 \left(\frac{R}{Max}\right)^2} \quad (7.5.2-2c)$$

$$U_{gl}(W) = ku(W) + |E(R)| \quad (7.5.2-3a)$$

$$U_{gl}(W) = ku(W) + |E^0| \quad (7.5.2-3b)$$

$$U_{gl}(W) = ku(W) + |E^0| \frac{R}{Max} \quad (7.5.2-3c)$$

Muy frecuentemente, (7.5.2-3a) se toma como base para el establecimiento de la incertidumbre global. Así pues,  $U(W) = ku(W)$  se aproxima frecuentemente por la siguiente ecuación

$$U(W) \approx U(W=0) + \left\{ \frac{U(W=Max) - U(W=0)}{Max} \right\} R \quad (7.5.2-3d)$$

y  $E(R)$  se aproxima frecuentemente por  $E(R) = a_1 R$  según (C2.2-16) y (C2.2-16a) por lo que

$$U_{gl}(W) \approx U(W=0) + \left\{ \frac{U(W=Max) - U(W=0)}{Max} \right\} R + |a_1| R \quad (7.5.2-3e)$$

Para información adicional sobre la obtención alternativa de la fórmula  $E(R)$  o el valor representativo  $E^0$ , véase el anexo C.

Análogamente a (7.5.2-3d), para instrumentos multi-escalón  $U(W)$  se indica por escalón como

$$U(W) \approx U(Max_{i-1}) + \left\{ \frac{U(Max_i) - U(Max_{i-1})}{Max_i - Max_{i-1}} \right\} \cdot (R - Max_{i-1}) \quad (7.5.2-3f)$$

y para instrumentos multi-rango  $U(W)$  se indica por rango.

Es importante asegurarse de que  $U_{gl}(W)$  mantenga una probabilidad de cobertura no inferior del 95% en todo el rango de pesaje. Para  $U_{gl}(W)$  el factor de cobertura  $k$  será, en la mayoría de los casos, igual a 2, aún cuando la desviación típica  $s$  se obtenga a partir de unas pocas medidas y/o cuando se haya establecido  $k_{cal} > 2$  en el certificado de calibración. Esto se debe al gran número de términos que contribuyen a  $u(W)$ .

### 7.5.3 Otras formas de evaluación del instrumento

Un cliente puede esperar, o haber solicitado, que el laboratorio de calibración emita una declaración de conformidad con unas especificaciones dadas, como

$|W - R| \leq Tol$  siendo  $Tol$  la tolerancia aplicable. La tolerancia puede estar especificada como " $Tol = x\%$  de  $R$ ", como " $Tol = n d$ ", o similares.

La conformidad puede declararse, de manera consistente con la norma ISO/IEC 17025 bajo la condición de que

$$|E(R) + U(W(R))| \leq Tol(R) \quad (7.5.3-1)$$

bien para valores individuales de  $R$ , o para valores cualesquiera en parte o la totalidad del rango de pesaje.

Dentro del mismo rango de pesaje, se puede declarar la conformidad en diferentes partes del rango de pesaje con diferentes valores de  $Tol$ .

En el caso de que el usuario defina un requisito de exactitud de pesaje relativo, el anexo G "Pesada mínima" proporciona orientación adicional.

## 8 CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Esta sección contiene orientaciones sobre la información que podría ser útil dar en un certificado de calibración. Pretende ser coherente con los requisitos de la norma ISO/IEC 17025, que tienen preferencia.

### 8.1 Información general

Identificación del laboratorio de calibración,  
referencia a la acreditación (organismo de acreditación, número de acreditación),  
identificación del certificado (número de calibración, fecha de emisión, número de páginas),  
firma(s) de la(s) persona(s) autorizada(s)

Identificación del cliente.

Identificación del instrumento calibrado,  
información sobre el instrumento (fabricante, tipo de instrumento,  $Max$ ,  $d$ , lugar de instalación)

Aviso de que el certificado solamente puede reproducirse íntegro, a no ser, que el laboratorio de calibración lo permita por escrito

### 8.2 Información sobre el procedimiento de calibración

Fecha de las mediciones,  
lugar de calibración,  
condiciones ambientales y/o de uso que puedan afectar a los resultados de calibración.

Información sobre el instrumento (ajuste realizado: ajuste interno o externo y en el caso de ajuste externo, qué pesa se ha utilizado, cualquier anomalía de funcionamiento, parámetros de configuración del software en la medida, que son relevantes para la calibración, etc.)

Referencia a, o descripción del procedimiento aplicado, en cuanto no es obvio a partir del certificado, por ejemplo, observación de un intervalo constante de tiempo entre cargas y/o lecturas.

Acuerdos con el cliente, por ejemplo, sobre una limitación del rango de calibración, especificaciones metrológicas respecto de las que se declarará la conformidad

Información sobre la trazabilidad de los resultados de medida

### 8.3 Resultados de medida

Indicaciones y/o errores para las cargas de ensayo aplicadas, o errores relacionados con las indicaciones, como valores discretos y/o mediante una ecuación que resulta de una aproximación,  
detalles del procedimiento de carga si es relevante para la comprensión de lo anterior,  
desviaciones típicas determinadas, identificadas como relacionadas con una única indicación,

Información relacionada con el ensayo de excentricidad realizado,  
incertidumbre expandida de medida del error de los resultados de indicación,  
indicación del factor de cobertura  $k$ , con el comentario sobre la probabilidad de cobertura y la razón para  $k \neq 2$  cuando proceda.

Cuando las indicaciones/errores no se han determinado mediante lecturas normales (lecturas únicas con la resolución normal del instrumento), debería incluirse una advertencia de que la incertidumbre declarada es menor que la que se encontraría con lecturas normales.

### 8.4 Información adicional

Puede darse información adicional sobre la incertidumbre de medida esperada en uso, incluyendo las condiciones bajo las que es aplicable, en un anexo al certificado, sin formar parte de él.

Cuando se tienen en cuenta los errores por corrección, se puede utilizar esta ecuación

$$W = R - E(R) \pm U(W) \quad (8.4-1)$$

acompañada por la ecuación de  $E(R)$ .

Cuando los errores se incluyen en la "incertidumbre global", podría usarse esta ecuación

$$W = R \pm U_{gl}(W) \quad (8.4-2)$$

Debería añadirse una declaración de que la incertidumbre expandida de los valores de la ecuación corresponde a una probabilidad de cobertura de, al menos, el 95 %.

Opcional:  
declaración de conformidad con una especificación dada y rango de validez, cuando aplique.

Esta declaración puede tener la forma

$$W = R \pm Tol \quad (8.4-3)$$

y puede darse

además de los resultados de medida, o  
como una declaración independiente, con referencia a que los resultados de medida declarados, se conservan en el laboratorio de calibración.

La declaración puede ir acompañada por un comentario que indique que todos los resultados de medida, incrementados en la incertidumbre expandida de medida, están dentro de los límites de la especificación.

Se puede aportar información relacionada con los valores de pesada mínima para varias tolerancias de pesaje, según el anexo G.

Para clientes con menor conocimiento, se pueden dar recomendaciones, cuando sea aplicable, sobre

la definición del error de indicación,  
cómo corregir las lecturas de uso restando los errores correspondientes,  
cómo interpretar las indicaciones y/o los errores presentados con menos dígitos que el escalón  $d$ .

Puede ser útil dar los valores de  $U(W^*)$ , bien para todos los errores individuales, bien para la función  $E(R)$  que resulta de la aproximación.

## 9 VALOR DE MASA O VALOR DE MASA CONVENCIONAL

La magnitud  $W$  es una estimación del valor de masa convencional  $m_c$  del objeto pesado<sup>6</sup>. Para ciertas aplicaciones puede ser necesario obtener a partir de  $W$ , el valor de masa  $m$ , o un valor más exacto de  $m_c$ .

Deben conocerse por otros medios la densidad  $\rho$  o el volumen  $V$  del objeto, junto con una estimación de su incertidumbre típica.

### 9.1 Valor de masa

La masa del objeto es

$$m = W[1 + \rho_a(1/\rho - 1/\rho_c)] \quad (9.1-1)$$

Despreciando los términos de segundo orden y superiores, la incertidumbre típica relativa  $u_{rel}(m)$  viene dada por

---

<sup>6</sup> En la mayoría de los casos, especialmente cuando los resultados se usan comercialmente, el valor de  $W$  se utiliza como resultado de la pesada.

$$u_{\text{rel}}^2(m) = \frac{u^2(W)}{W^2} + u^2(\rho_a) \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c} \right)^2 + \rho_a^2 \frac{u^2(\rho)}{\rho^4} \quad (9.1-2)$$

Para  $\rho_a$  y  $u(\rho_a)$  (densidad del aire), véase el anexo A.

Si se conocen  $V$  y  $u(V)$  en lugar de  $\rho$  y  $u(\rho)$ ,  $\rho$  puede aproximarse por  $W/V$  y  $u_{\text{rel}}(\rho)$  puede reemplazarse por  $u_{\text{rel}}(V)$ .

## 9.2 Valor de masa convencional

El valor de masa convencional del objeto es

$$m_c = W [1 + (\rho_a - \rho_0)(1/\rho - 1/\rho_c)] \quad (9.2-1)$$

Despreciando términos de segundo orden y superiores, la desviación típica relativa  $u_{\text{rel}}(m_c)$  viene dada por

$$u_{\text{rel}}^2(m_c) = \frac{u^2(W)}{W^2} + u^2(\rho_a) \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c} \right)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 \frac{u^2(\rho)}{\rho^4} \quad (9.2-2)$$

Se aplican los mismos comentarios que a (9.1-2).

## 10 REFERENCIAS

- [1] *JCGM 100:2008 (GUM 1995 con ligeras correcciones) Evaluación de datos de medición — Guía para la incertidumbre de medida*, 2009, CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA
- [2] *OIML R 76: Non-automatic Weighing Instruments Part 1: Metrological Requirements - Tests*, Edition 2006 (E)
- [3] *UNE-EN 45501: Aspectos metrológicos de los instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático*, Edición 2016
- [4] *OIML R111, Weights of Classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3, M3*, Edition 2004 (E)
- [5] *JCGM 200:2012, Vocabulario Internacional de Metrología: Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)*, 3ª edición en español 2012, Traducción de la 3ª edición del VIM 2008 con inclusión de pequeñas correcciones, CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA
- [6] M. Kochsiek, M. Glaser, *Comprehensive Mass Metrology*, WILEY-VCH Verlag Berlin GmbH, Berlin. ISBN 3-527-29614-X
- [7] M. Gläser: Change of the apparent mass of weights arising from temperature differences, *Metrologia* 36 (1999), p. 183-197
- [8] *ILAC P10:01/2013, ILAC Policy on the Traceability of Measurement Results*, 2013

- [9] JCGM 101:2008, *Evaluación de los datos de medición – Suplemento 1 de la "Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida" – Propagación de distribuciones aplicando el método de Monte Carlo*, 1ª edición de la traducción al español, 2010, CENTRO ESPAÑOL DE METROLOGÍA
- [10] A. Malengo, Buoyancy effects and correlation in calibration and use of electronic balances, *Metrologia* 51 (2014) p. 441–451
- [11] A. Picard, R. S. Davis, M. Gläser, K. Fujii: Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007), *Metrologia* 45 (2008), p. 149-155
- [12] R. T. Birge, The Calculation of Errors by the Method of Least Squares, *Phys. Rev.* 40, 207 (1932)
- [13] R. Nater, A. Reichmuth, R. Schwartz, M. Borys and P. Zervos, *Dictionary of Weighing Terms – A Guide to the Terminology of Weighing*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-642-02013-1

## ANEXO A: RECOMENDACIONES SOBRE LA ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE

Nota: En el anexo A, los símbolos son  $T$  para la temperatura en K y  $t$  para la temperatura en °C.

### A1 Fórmulas para la densidad del aire

La fórmula más exacta para determinar la densidad del aire húmedo es la recomendada por el CIPM [11]<sup>7</sup>. Para los objetivos de esta Guía, son suficientes fórmulas menos complejas que proporcionan resultados ligeramente menos precisos.

#### A1.1 Versión simplificada de la fórmula del CIPM, versión exponencial

Del documento OIML R111 [4], anexo E3 se tiene

$$\rho_a = \frac{0,34848 p - 0,009 RH \exp(0,061t)}{273,15 + t} \quad (\text{A1.1-1})$$

siendo

$\rho_a$	densidad del aire en kg/m <sup>3</sup>
$p$	presión barométrica en hPa
$RH$	humedad relativa del aire en %
$t$	temperatura del aire en °C

La incertidumbre relativa de esta fórmula aproximada es  $u_{\text{form}} / \rho_a = 2,4 \times 10^{-4}$  bajo las siguientes condiciones ambientales

$$\begin{aligned} 600 \text{ hPa} &\leq p \leq 1000 \text{ hPa} \\ 20 \% &\leq RH \leq 80 \% \\ 15 \text{ }^\circ\text{C} &\leq t \leq 27 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

La incertidumbre de  $\rho_a$  viene determinada, además de por la incertidumbre  $u_{\text{form}}$ , por las incertidumbres de los valores estimados de  $p$ ,  $RH$  y  $t$  (véase el anexo A3).

#### A1.2 Densidad media del aire

Cuando no es posible realizar mediciones de la temperatura y la presión barométrica, la densidad media del aire en un lugar puede calcularse a partir de la altitud sobre el nivel del mar, como se recomienda en [4]:

<sup>7</sup> La incertidumbre relativa de la fórmula CIPM-2007 para la densidad del aire, sin las incertidumbres de los parámetros, es  $u_{\text{form}} / \rho_a = 2,2 \times 10^{-5}$ , la mejor incertidumbre relativa que puede conseguirse, que incluye las contribuciones de incertidumbre de la temperatura, presión y humedad relativa, está alrededor de  $u(\rho_a) / \rho_a = 8 \times 10^{-5}$ . Los rangos recomendados de temperatura y presión en los que puede utilizarse la ecuación CIPM-2007 son:  $600 \text{ hPa} \leq p \leq 1000 \text{ hPa}$ ,  $15 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 27 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$\rho_a = \rho_0 \exp\left(-\frac{\rho_0}{p_0} g h_{SL}\right) \quad (\text{A1.2-1})$$

siendo  $p_0 = 1\,013,25$  hPa  
 $\rho_0 = 1,200$  kg/m<sup>3</sup>  
 $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>  
 $h_{SL}$  = altitud sobre el nivel del mar en metros

Este cálculo de la densidad del aire es aplicable a 20 °C y  $RH = 50\%$ .

La incertidumbre relativa de esta fórmula aproximada es  $u_{\text{form}} / \rho_a = 1,2 \times 10^{-2}$ .

## A2 Variaciones de los parámetros que contribuyen a la densidad del aire

En el próximo apartado se proporcionan algunas indicaciones sobre las variaciones típicas de  $p$ ,  $RH$  y  $t$ , para poder evaluar las incertidumbres que tienen asociadas. Esta información puede utilizarse cuando no se van a realizar mediciones de las condiciones ambientales.

### A2.1 Presión barométrica

En cualquier lugar, la variación es, como máximo,  $\Delta p = \pm 40$  hPa sobre la media<sup>8</sup>. Dentro de esos límites, la distribución no es rectangular ya que los valores extremos ocurren solamente una vez en un periodo de varios años. Se ha hallado que la distribución es básicamente normal. Teniendo en cuenta la variación típica de la presión atmosférica, es realista suponer una incertidumbre típica

$$u(p) = 10 \text{ hPa} \quad (\text{A2.1-1})$$

La presión barométrica media  $p(h_{SL})$  (en hPa) puede evaluarse según la Atmósfera Normalizada Internacional y puede estimarse a partir de la altitud  $h_{SL}$  en m sobre el nivel del mar del lugar, usando la relación

$$p(h_{SL}) = p_0 \exp(-h_{SL} \times 0,00012 \text{ m}^{-1}) \quad (\text{A2.1-2})$$

siendo  $p_0 = 1\,013,25$  hPa

### A2.2 Temperatura

La posible variación  $\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$  de la temperatura en el lugar de uso del instrumento puede estimarse a partir de información fácil de obtener:

límites declarados por el cliente a partir de su experiencia,

<sup>8</sup> Ejemplo: en Hannover, Alemania, la diferencia entre la máxima y mínima presión barométrica registrada a lo largo de 20 años fue de 77,1 hPa (Información de DWD, Servicio Meteorológico Alemán).

lectura de mecanismos de registro apropiados,  
configuración del instrumento de control, cuando la sala está climatizada  
o con temperatura estabilizada;

en su ausencia deben aplicarse criterios fundamentados, conduciendo, por ejemplo, a:

$17\text{ °C} \leq t \leq 27\text{ °C}$  para una oficina o laboratorio, cerrado, con ventanas,  
 $\Delta T \leq 5\text{ K}$  para habitaciones cerradas sin ventanas, en el centro de un edificio,  
 $-10\text{ °C} \leq t \leq +30\text{ °C}$  o  $\Delta T \leq 40\text{ K}$  para talleres abiertos o salas de fabricación.

Igual que en el caso de la presión barométrica, es improbable que se dé una distribución rectangular en talleres abiertos o salas de fabricación donde domina la temperatura atmosférica. Sin embargo, para evitar suposiciones diferentes para diferentes condiciones de las salas, se recomienda la suposición de la distribución rectangular, que conlleva

$$u(T) = \Delta T / \sqrt{12} \quad (\text{A2.2-1})$$

### A2.3 Humedad relativa

La posible variación  $\Delta RH = RH_{\max} - RH_{\min}$  de la humedad relativa en el lugar de uso del instrumento puede estimarse a partir de información que es fácil de obtener:

límites declarados por el cliente a partir de su experiencia,  
lectura de mecanismos de registro apropiados,  
configuración del instrumento de control, cuando la sala está climatizada;

en su ausencia deben aplicarse criterios fundamentados, conduciendo, por ejemplo, a:

$30\% \leq RH \leq 80\%$  para una oficina o laboratorio, cerrado, con ventanas,  
 $\Delta RH \leq 30\%$  para habitaciones cerradas sin ventanas, en el centro de un edificio,  
 $20\% \leq RH \leq 80\%$  para talleres abiertos, salas de fabricación.

Ha de tenerse presente que

- a  $RH < 40\%$  los efectos electrostáticos pueden afectar a los resultados de pesada de instrumentos de alta resolución,
- a  $RH > 60\%$  puede empezar a producirse corrosión.

Como en el caso de la presión barométrica, es improbable que se dé una distribución rectangular en talleres abiertos o salas de fabricación donde domina la humedad relativa atmosférica. Sin embargo, para evitar suposiciones diferentes para diferentes condiciones de las salas, se recomienda la suposición de la distribución rectangular, que conlleva

$$u(RH) = \Delta RH / \sqrt{12} \quad (\text{A2.3-1})$$

### A3 Incertidumbre de la densidad del aire

La incertidumbre típica relativa de la densidad del aire  $u(\rho_a)/\rho_a$  puede calcularse mediante

$$\frac{u(\rho_a)}{\rho_a} = \sqrt{\left(\frac{u_p(\rho_a)}{\rho_a} \cdot u(p)\right)^2 + \left(\frac{u_T(\rho_a)}{\rho_a} \cdot u(T)\right)^2 + \left(\frac{u_{RH}(\rho_a)}{\rho_a} \cdot u(RH)\right)^2 + \left(\frac{u_{\text{form}}(\rho_a)}{\rho_a}\right)^2} \quad (\text{A3-1})$$

con los coeficientes de sensibilidad (derivados de la fórmula del CIPM para la densidad de aire)

$$\begin{aligned} u_p(\rho_a)/\rho_a &= 1 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1} \text{ para presión barométrica} \\ u_T(\rho_a)/\rho_a &= -4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ para la temperatura ambiente} \\ u_{RH}(\rho_a)/\rho_a &= -9 \times 10^{-3} \text{ para la humedad relativa (la unidad para } RH \\ &\text{ en este caso es 1, no \%)} \end{aligned}$$

Estos coeficientes de sensibilidad pueden utilizarse también en la ecuación (A1.1-1).

La ecuación (A3-1) puede aproximarse por la (A3-2) bajo las siguientes suposiciones:

- la desviación típica de la variación de presión basada en datos meteorológicos, que muestran que es una distribución normal, es de 10 hPa,
- la variación máxima de humedad relativa es del 100 %,
- la variación máxima de temperatura en el emplazamiento se incluye como  $\Delta T$ .

$$\frac{u(\rho_a)}{\rho_a} = \sqrt{1,07 \times 10^{-4} + 1,33 \times 10^{-6} \text{ K}^{-2} \Delta T^2} \quad (\text{A3-2})$$

**Ejemplos de la incertidumbre típica de la densidad del aire, calculada para diferentes parámetros, utilizando la fórmula (A.1.1-1)**

$u(p)$ /hPa	$\Delta T$ /K	$\Delta RH$ /%	$\frac{u_p(\rho_a)}{\rho_a} u(p)$	$\frac{u_T(\rho_a)}{\rho_a} u(T)$	$\frac{u_{RH}(\rho_a)}{\rho_a} u(RH)$	$\frac{u_{\text{form}}(\rho_a)}{\rho_a}$	$\frac{u(\rho_a)}{\rho_a}$
10	2	20	$1 \times 10^{-2}$	$-2,31 \times 10^{-3}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-2}$
10	2	100	$1 \times 10^{-2}$	$-2,31 \times 10^{-3}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$1,06 \times 10^{-2}$
10	5	20	$1 \times 10^{-2}$	$-5,77 \times 10^{-3}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$1,16 \times 10^{-2}$
10	5	100	$1 \times 10^{-2}$	$-5,77 \times 10^{-3}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$1,18 \times 10^{-2}$
10	10	20	$1 \times 10^{-2}$	$-1,15 \times 10^{-3}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$1,53 \times 10^{-2}$
10	10	100	$1 \times 10^{-2}$	$-1,15 \times 10^{-3}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$1,55 \times 10^{-2}$
10	20	20	$1 \times 10^{-2}$	$-2,31 \times 10^{-2}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$2,52 \times 10^{-2}$
10	20	100	$1 \times 10^{-2}$	$-2,31 \times 10^{-2}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$2,53 \times 10^{-2}$
10	30	20	$1 \times 10^{-2}$	$-3,46 \times 10^{-2}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$3,61 \times 10^{-2}$
10	30	100	$1 \times 10^{-2}$	$-3,46 \times 10^{-2}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$3,61 \times 10^{-2}$
10	40	20	$1 \times 10^{-2}$	$-4,62 \times 10^{-2}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$4,73 \times 10^{-2}$
10	40	100	$1 \times 10^{-2}$	$-4,62 \times 10^{-2}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$4,73 \times 10^{-2}$
10	50	20	$1 \times 10^{-2}$	$-5,77 \times 10^{-2}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$5,86 \times 10^{-2}$
10	50	100	$1 \times 10^{-2}$	$-5,77 \times 10^{-2}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$5,87 \times 10^{-2}$

$\Delta T$  es la variación máxima de temperatura y  $\Delta RH$  es la variación máxima de humedad relativa en la ubicación de la balanza.

## ANEXO B: FACTOR DE COBERTURA $k$ PARA LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DE MEDIDA

Nota: en este anexo se utiliza el símbolo general  $y$  para el resultado de medida, no una magnitud particular como una indicación, un error, una masa de un cuerpo pesado, etc.

### B1 Objetivo

El factor de cobertura  $k$  debe escogerse, en todos los casos, de forma que la incertidumbre expandida de medida tenga una probabilidad de cobertura de 95,45 %.

### B2 Distribución normal y fiabilidad suficiente

El valor  $k = 2$ , correspondiente a una probabilidad de 95,45 %, se aplica cuando:

a) se puede asignar una distribución normal (gaussiana) al error de indicación y

b) la incertidumbre típica  $u(E)$  es suficientemente fiable (es decir, tiene un número suficiente de grados de libertad), véase el documento JGCM 100 [1].

La distribución normal puede suponerse cuando varias ( $N \geq 3$ ) contribuciones de incertidumbre, cada una de ellas derivada de distribuciones "bien comportadas" (normal, rectangular o similar), contribuyen a  $u(E)$  en cantidades comparables.

La fiabilidad suficiente depende de los grados de libertad. Este criterio se satisface cuando ninguna contribución de Tipo A a  $u(E)$  se basa en menos de 10 observaciones. Una contribución típicamente de Tipo A proviene de la repetibilidad. Por ello, si durante un ensayo de repetibilidad una carga se aplica no menos de 10 veces, puede suponerse que hay suficiente fiabilidad.

### B3 Distribución normal, sin suficiente fiabilidad

Cuando la distribución del error de indicación puede suponerse normal, pero  $u(E)$  no es suficientemente fiable, entonces los grados efectivos de libertad  $\nu_{\text{eff}}$  deben determinarse mediante la fórmula de Welch-Satterthwaite

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(E)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(E)}{\nu_i}} \quad (\text{B3-1})$$

donde las  $u_i(E)$  son las contribuciones a la incertidumbre típica según (7.1.3-1a) y los  $\nu_i$  son los grados de libertad de la contribución de incertidumbre típica  $u_i(E)$ . Basándose en  $\nu_{\text{eff}}$  el factor de cobertura aplicable  $k$  se obtiene de la tabla extendida de [1], Tabla G.2 o puede usarse la distribución  $t$  descrita en [1], anexo C.3.8 para determinar el factor de cobertura  $k$ .

#### B4 Determinando $k$ para distribuciones no normales

En todos los casos siguientes, la incertidumbre expandida es  $U(y) = ku(y)$ .

Puede ser obvio, en una situación dada, que  $u(y)$  contiene una componente de incertidumbre Tipo B  $u_1(y)$  para una incertidumbre cuya distribución no es normal, sino, por ejemplo, triangular o rectangular, que es significativamente mayor que todas las componentes restantes. En ese caso,  $u(y)$  se divide en la parte (posiblemente dominante)  $u_1$  y  $u_R = \text{raíz cuadrada de } \sum u_j^2 \text{ siendo } j \geq 2$ , la incertidumbre típica combinada de las restantes contribuciones, véase [1].

Si  $u_R \leq 0,3 u_1$ , entonces  $u_1$  se considera "dominante" y la distribución de  $y$  se considera esencialmente idéntica a la de la distribución dominante.

El factor de cobertura se elige según la forma de la distribución de la componente dominante:

para una distribución trapezoidal con  $\beta < 0,95$ ,  
 ( $\beta = \text{parámetro de apuntamiento, cociente entre el menor y el mayor de los lados paralelos del trapecio}$ )

$$k = \left\{ 1 - \sqrt{[0,05(1 - \beta^2)]} \right\} / \sqrt{[(1 + \beta^2)/6]} \quad (\text{B4-1})$$

para una distribución rectangular ( $\beta = 1$ ),  $k = 1,65$ ,

para una distribución triangular ( $\beta = 0$ ),  $k = 1,90$ ,

para una distribución con forma de U,  $k = 1,41$ .

La componente dominante puede, a su vez, estar formada por dos componentes dominantes  $u_1(y)$ ,  $u_2(y)$ , por ejemplo, 2 rectangulares que forman una trapezoidal, en cuyo caso  $u_R$  se determina a partir de las restantes  $u_j$  con  $j \geq 3$ .

## ANEXO C: FÓRMULAS QUE DESCRIBEN LOS ERRORES EN RELACIÓN A LAS INDICACIONES

### C1 Objetivo

Este anexo proporciona consejo sobre cómo derivar, a partir de los valores discretos obtenidos en una calibración y/o presentes en un certificado de calibración, los errores e incertidumbres asociadas para cualquier otra lectura  $R$  dentro del alcance de pesaje calibrado.

Se supone que la calibración proporciona  $n$  conjuntos de datos  $I_{N_j}, E_j, U_j$ , o alternativamente  $m_{N_j}, I_j, U_j$ , junto con el factor de cobertura  $k$  y una indicación de la distribución de  $E$  a la que corresponde  $k$ .

En cualquier caso, se considera que la indicación nominal  $I_{N_j}$  es  $I_{N_j} = m_{N_j}$ .

Se considera, además, que para cualquier  $m_{N_j}$  el error  $E_j$  permanece constante si  $I_j$  se sustituye por  $I_{N_j}$ , por lo que es suficiente mirar a los datos  $I_{N_j}, E_j, u_j$  y omitir el subíndice  $N$  por simplicidad.

### C2 Relaciones funcionales

#### C2.1 Interpolación

Hay varias fórmulas polinómicas para la interpolación<sup>9</sup> entre valores tabulados y valores equidistantes, que son relativamente fáciles de usar. Las cargas de ensayo, sin embargo, pueden, en muchos casos, no ser equidistantes, lo que conlleva fórmulas de interpolación bastante complicadas si se desea una sola fórmula que cubra todo el alcance de pesaje.

Se puede realizar la interpolación lineal entre dos puntos adyacentes mediante

$$E(R) = E_k + (R - I_k)(E_{k+1} - E_k)/(I_{k+1} - I_k) \quad (C2.1-1)$$

$$U(E(R)) = U_k + (R - I_k)(U_{k+1} - U_k)/(I_{k+1} - I_k) \quad (C2.1-2)$$

para una lectura  $R$  con  $I_k < R < I_{k+1}$ . Se necesitará un polinomio de orden superior para estimar el posible error de interpolación (no se trata posteriormente en este documento).

#### C2.2 Aproximación

La aproximación debería realizarse mediante cálculos o algoritmos basados en el enfoque de "mínima  $\chi^2$ ", es decir, los parámetros de una función  $f$  se

---

<sup>9</sup> Se entiende que una fórmula de interpolación proporciona exactamente los valores originales entre los que se realiza la interpolación. Una fórmula de aproximación no proporcionará exactamente, de forma habitual, los valores originales.

determinan de manera que:

$$\chi^2 = \sum p_j v_j^2 = \sum p_j (f(I_j) - E_j)^2 = \text{mínimo} \quad (\text{C2.2-1})$$

siendo

$p_j$  = factor de ponderación (básicamente proporcional a  $1/u_j^2$ ),

$v_j$  = residuo,

$f$  = función de aproximación que contiene  $n_{\text{par}}$  parámetros a determinar,

$j = 1 \dots n$ ,

$n$  = número de puntos de ensayo.

A partir del valor chi cuadrado observado  $\chi^2_{\text{obs}}$ , si se cumple la siguiente condición [12]

$$\chi^2_{\text{obs}} \leq \nu \quad (\text{C2.2-2a})$$

con los grados de libertad  $\nu = n - n_{\text{par}}$ , está justificado suponer que la forma de la función modelo  $E(I) = f(I)$  es matemáticamente consistente con los datos sobre los que se realiza la aproximación.

Una opción alternativa para comprobar la bondad del ajuste es suponer que el valor máximo de las diferencias ponderadas debe cumplir

$$\max \left( \frac{|f(I_j) - E_j|}{U(f(I_j))} \right) < 1 \quad (\text{C2.2-2b})$$

es decir, la incertidumbre expandida debe incluir al residuo para cada punto  $j$ . Esta condición es mucho más restrictiva que la ecuación (C2.2-2a).

### C2.2.1 Aproximación mediante polinomios

La aproximación por un polinomio da la función general

$$E(R) = f(R) = a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + \dots + a_{n_a} R^{n_a} \quad (\text{C2.2-3})$$

El grado  $n_a$  del polinomio debería escogerse de forma que  $n_{\text{par}} = n_a + 1 \leq n/2$ .

El cálculo se realiza de manera óptima en forma matricial.

Sea

$\mathbf{X}_{(n \times n_{\text{par}})}$  una matriz cuyas  $n$  filas son  $(1, I_j, I_j^2, \dots, I_j^{n_a})$ ,

$\mathbf{a}_{(n_{\text{par}} \times 1)}$  un vector columna cuyas componentes son los

$e_{(n \times 1)}$  coeficientes  $a_0, a_1, \dots, a_{n_a}$  del polinomio de aproximación,  
 un vector columna cuyas componentes son los  $E_j$ ,  
 $U(e)_{(n \times n)}$  la matriz varianza-covarianza de  $e$ .

$U(e)$  viene dada por

$$U(e) = U(m_{\text{ref}}) + U(I_{\text{Cal}}) + U(mod) \quad (C2.2-3a)$$

donde

$U(m_{\text{ref}})$  es la matriz de covarianza asociada a los valores de referencia  $m_{\text{ref}}$  (4.2.4-2). Considerando una correlación razonablemente alta entre los valores de referencia

$$U(m_{\text{ref}}) = s_{m_{\text{ref}}} s_{m_{\text{ref}}}^T \quad (C2.2-3b)$$

donde  $s_{m_{\text{ref}}}$  es el vector columna de las incertidumbres  $u(m_{\text{ref}})$  (ec. 7.1.2-14),

$U(I_{\text{Cal}})$  es una matriz diagonal cuyos elementos son  $u_{jj} = u^2(I_j)$ ,

$U(mod)$  es una matriz covarianza adicional, dada por

$$U(mod) = s_m^2 I \quad (C2.2-3c)$$

donde  $I$  es la matriz identidad y  $s_m$  es una incertidumbre debida al modelo. Esta contribución se toma en consideración para dar cuenta de la inadecuación del modelo.

Inicialmente  $s_m$  se fija en cero, si el test  $\chi^2$  (C2.2-2a) falla,  $s_m$  se aumenta de forma iterativa, hasta que se cumple el test  $\chi^2$ .

Si  $U(I_{\text{Cal}})$  es la contribución dominante, pueden despreciarse las covarianzas y  $U(e)$  puede aproximarse por una matriz diagonal cuyos elementos son

$$u_{jj} = u^2(E_j) + s_m^2 \quad (C2.2-3d)$$

La matriz de ponderación  $P$  es

$$P = U(e)^{-1} \quad (C2.2-4)$$

y los coeficientes  $a_0, a_1, \dots$  se obtienen resolviendo la ecuación normal

$$X^T P X a - X^T P e = 0 \quad (C2.2-5)$$

que tiene como solución

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{e} \quad (\text{C.2.2-6})$$

Los  $n$  residuos  $v_j = f(I_j) - E_j$  forman el vector

$$\mathbf{v} = \mathbf{X} \hat{\mathbf{a}} - \mathbf{e} \quad (\text{C.2.2-7})$$

y  $\chi_{\text{obs}}^2$  se obtiene mediante

$$\chi_{\text{obs}}^2 = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \quad (\text{C.2.2-8})$$

Si se cumple la condición (C.2.2-2), las varianzas y covarianzas de los coeficientes  $a_i$  vienen dados por la matriz

$$\mathbf{U}(\hat{\mathbf{a}}) = (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} \quad (\text{C.2.2-9})$$

Si no se cumple la condición (C.2.2-2), puede aplicarse uno de estos procedimientos:

- a: repetir la aproximación con un polinomio de aproximación de mayor grado  $n_a$ , siempre que  $n_a + 1 \leq n/2$ ,
- b: repetir la aproximación después de aumentar  $\mathbf{U}(\text{mod})$ .

Los resultados de la aproximación,  $\hat{\mathbf{a}}$  y  $\mathbf{U}(\hat{\mathbf{a}})$ , pueden usarse para determinar los errores dados por la aproximación y las incertidumbres asociadas a los  $n$  puntos de calibración  $I_j$ .

Los errores  $E_{\text{appr}j}$  forman el vector

$$\mathbf{e}_{\text{appr}} = \mathbf{X} \hat{\mathbf{a}} \quad (\text{C.2.2-10})$$

con incertidumbres dadas por

$$u^2(E_{\text{appr}j}) = \text{diag}(\mathbf{X} \mathbf{U}(\hat{\mathbf{a}}) \mathbf{X}^T). \quad (\text{C.2.2-11})$$

que también sirven para determinar el error y la incertidumbre asociada de cualquier otra indicación (llamada una lectura  $R$  para distinguirla de las indicaciones  $I_j$ ) dentro del rango de pesaje calibrado.

Sea

- $\mathbf{r}$  un vector columna cuyos elementos son  $(1, R, R^2, R^3, \dots, R^{n_a})^T$ ,
- $\mathbf{r}'$  un vector columna cuyos elementos son las derivadas  $(0, 1, 2R, 3R^2, \dots, n_a R^{n_a-1})^T$ .

El error es

$$E_{\text{appr}}(R) = \mathbf{r}^T \hat{\mathbf{a}} \quad (\text{C.2.2-12})$$

y su incertidumbre viene dada por

$$u^2(E_{\text{appr}}) = (\mathbf{r}'^T \hat{\mathbf{a}}) \mathbf{U}(R) (\mathbf{r}'^T \hat{\mathbf{a}})^T + \mathbf{r}'^T \mathbf{U}(\hat{\mathbf{a}}) \mathbf{r} \quad (\text{C2.2-13})$$

El primer término de la parte derecha de la ecuación se simplifica, ya que las tres matrices son unidimensionales, a

$$(\mathbf{r}'^T \hat{\mathbf{a}}) \mathbf{U}(R) (\mathbf{r}'^T \hat{\mathbf{a}})^T = (a_1 + 2a_2R + 3a_3R^2 + \dots + n_a a_{n_a} R^{n_a-1})^2 u^2(R) \quad (\text{C2.2-14})$$

con  $u^2(R) = d_0^2/12 + d_R^2/12 + s^2(R) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{ecc}})R^2$  según (7.1.1-12).

### C2.2.2 Aproximación mediante una línea recta

Muchos instrumentos electrónicos modernos están bien diseñados y corregidos internamente para obtener una buena linealidad. Por ello, los errores resultan, mayormente, de un ajuste incorrecto y, básicamente, aumentan en proporción a  $R$ . Para estos instrumentos puede ser adecuado restringir el polinomio a una función lineal, siempre que sea suficiente según la condición de (C.2.2-2).

La solución habitual es aplicar (C.2.2-3) con  $n_a = 1$

$$E(R) = f(R) = a_0 + a_1R \quad (\text{C2.2-15})$$

Una variante de esto es fijar  $a_0 = 0$  y determinar solamente  $a_1$ . Esto puede justificarse por el hecho de que, debido a la puesta a cero, se da automáticamente (al menos para cargas crecientes) que el error es  $E(R=0)$  es cero

$$E(R) = f(R) = a_1R \quad (\text{C2.2-16})$$

Otra variante es definir el coeficiente  $a$  ( $= a_1$  en (C2.2-16)) como la media de todos los errores relativos  $q_j = E_j/I_j$ . Esto permite incluir los errores de las indicaciones netas después de una operación de tara, si se han determinado durante la calibración:

$$a = \sum (E_j/I_j) / n \quad (\text{C2.2-17})$$

Los cálculos, excepto en el caso de la variante (C2.2-17), pueden realizarse utilizando las fórmulas matriciales de C.2.2.1.

A continuación se proporcionan otras posibilidades.

C2.2.2.1 La regresión lineal según (C2.2-12) puede realizarse mediante software.

La correspondencia entre resultados es típicamente

$$\begin{aligned} \text{"intersección"} &\Leftrightarrow a_0 \\ \text{"pendiente"} &\Leftrightarrow a_1 \end{aligned}$$

Sin embargo, las calculadoras de bolsillo pueden no ser capaces de realizar regresiones lineales con errores ponderados, o regresiones lineales con  $a_0 = 0$ .

C2.2.2.2 Para facilitar la programación de los cálculos con ordenador en notación no matricial, se proporcionan a continuación las fórmulas necesarias.

Si se va a cumplir la condición (C2.2-2a), el método empieza con la primera regresión lineal utilizando

$$p_j = 1/u^2(E_j) \quad (C2.2-18a)$$

Si todavía no se cumple la condición (C2.2-2a), la desviación típica del ajuste puede determinarse como

$$std\ fit = \sqrt{\frac{\sum_j (f(I_j) - E_j)^2}{(n - n_{par})}} \quad (C2.2-18b)$$

Como segundo paso deben determinarse nuevos factores de ponderación

$$p'_j = 1/(u^2(E_j) + std\ fit^2) \quad (C2.2-18c)$$

Debe determinarse una nueva regresión lineal con estos nuevos factores de ponderación. Siguiendo este método, la regresión lineal cumple la condición (C2.2-2a).

Si se va a cumplir la condición (C2.2-2b), que es más restrictiva, es muy probable que deba añadirse una componente adicional de incertidumbre,  $s_m$  (C2.2-18a). Inicialmente  $s_m$  se fija en cero y luego se va aumentando de forma iterativa hasta que se satisface la condición (C2.2-2b). Una propuesta de aumentar el escalón para aumentar  $s_m$ , podría ser considerar 1/10 de la resolución del instrumento.

Por simplicidad, en las siguientes expresiones se han omitido todos los índices "j" en  $I$ ,  $E$ ,  $p$ .

a) regresión lineal (C2.2-15)

$$a_0 = \frac{\sum pE \sum pI^2 - \sum pI \sum pIE}{\sum p \sum pI^2 - (\sum pI)^2} \quad (C2.2-15a)$$

$$a_1 = \frac{\sum p \sum pIE - \sum pE \sum pI}{\sum p \sum pI^2 - (\sum pI)^2} \quad (C2.2-15b)$$

$$\chi^2 = \sum p(a_0 + a_1I - E)^2 \quad (C2.2-15c)$$

$$u^2(a_0) = \frac{\sum pI^2}{\sum p \sum pI^2 - (\sum pI)^2} \quad (\text{C2.2-15d})$$

$$u^2(a_1) = \frac{\sum p}{\sum p \sum pI^2 - (\sum pI)^2} \quad (\text{C2.2-15e})$$

$$\text{cov}(a_0, a_1) = -\frac{\sum pI}{\sum p \sum pI^2 - (\sum pI)^2} \quad (\text{C2.2-15f})$$

(C.2.2-15) se aplica al error aproximado de la lectura  $R$  y la incertidumbre de la aproximación  $u(E_{\text{appr}})$  viene dada por

$$u^2(E_{\text{appr}}) = a_1^2 u^2(R) + u^2(a_0) + R^2 u^2(a_1) + 2R \text{cov}(a_0, a_1) \quad (\text{C2.2-15g})$$

b) regresión lineal con  $a_0 = 0$

$$a_1 = \sum pIE / \sum pI^2 \quad (\text{C2.2-16a})$$

$$\chi^2 = \sum p(a_1 I - E)^2 \quad (\text{C2.2-16b})$$

$$u^2(a_1) = 1 / \sum pI^2 \quad (\text{C2.2-16c})$$

(C2.2-16) se aplica al error aproximado de la lectura  $R$  y la incertidumbre asociada  $u(E_{\text{appr}})$  viene dada por

$$u^2(E_{\text{appr}}) = a_1^2 u^2(R) + R^2 u^2(a_1) \quad (\text{C2.2-16d})$$

c) gradientes medios

En esta variante las incertidumbres son  $u(E_j/I_j) = u(E_j)/I_j$  y  $p_j = I_j^2 / u^2(E_j)$ .

$$a = (\sum pE/I) / \sum p \quad (\text{C2.2-17a})$$

$$\chi^2 = \sum p(a - E/I)^2 \quad (\text{C2.2-17b})$$

$$u^2(a) = 1 / \sum p \quad (\text{C2.2-17c})$$

(C2.2-17) se aplica al error aproximado de la lectura  $R$  que también puede ser una indicación neta, y la incertidumbre de la aproximación  $u(E_{\text{appr}})$  viene dada por

$$u^2(E_{\text{appr}}) = a^2 u^2(R) + R^2 u^2(a) \quad (\text{C2.2-17d})$$

### C3 Términos sin relación con las lecturas

Aunque los términos que no son función de la indicación no ofrecen ningún valor estimado del error que se espera en una lectura en uso dada, pueden ser útiles para derivar la "incertidumbre global" mencionada en el apartado 7.5.2.

#### C3.1 Error medio

La media de todos los errores es

$$E^0 = \bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_j \quad (\text{C3.1-1})$$

con desviación típica

$$s(E) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\bar{E} - E_j)^2} = u_{\text{appr}} \quad (\text{C3.1-2})$$

Nota: el punto experimental  $I = 0$ ,  $E = 0$  debe incluirse como  $I_1$ ,  $E_1$ .

Cuando  $\bar{E}$  es próximo a 0, puede añadirse solamente  $s^2(E)$  en (7.5.2-2a). En los otros casos, en particular cuando  $|\bar{E}| \geq u(W)$ , debería usarse (7.5.2-3a) con  $u(W)$  aumentada en  $u_{\text{appr}} = s(E)$ .

#### C3.2 Error máximo

El "error máximo" debe entenderse como el mayor valor absoluto de todos los errores:

$$E_{\text{max}} = |E_j|_{\text{max}} \quad (\text{C3.2-1})$$

C3.2.1 Con  $E^0 = E_{\text{max}}$ , (7.5.2-3a) describiría ciertamente una "incertidumbre global" que cubriría cualquier error en el rango de pesaje con una probabilidad de cobertura mayor del 95 %. La ventaja es que la fórmula es simple y directa.

C3.2.2 Suponiendo una distribución rectangular de todos los errores en el rango (ficticio!)  $\pm E_{\text{max}}$ ,  $E^0$  podría definirse como la desviación típica de los errores

$$E^0 = E_{\text{max}} / \sqrt{3} \quad (\text{C3.2-2})$$

que se insertaría en (7.5.2-2a).

## ANEXO D: SÍMBOLOS

Los símbolos que se usan en más de una sección del documento principal, se listan y explican a continuación.

Símbolo	Definición
$D$	deriva, variación de un valor con el tiempo
$E$	error (de una indicación)
$I$	indicación de un instrumento
$I_{\text{ref}}$	valor de referencia de la indicación de un instrumento
$K_T$	sensibilidad del instrumento a la variación de temperatura
$L$	carga de un instrumento
$Max$	alcance máximo de pesaje
$Max_1$	límite superior del rango de pesaje con el escalón mínimo
$Max'$	límite superior de un rango de pesaje especificado, $Max' < Max$
$Min$	valor de la carga por debajo del cual el resultado de pesada puede estar afectado por un error relativo excesivo (de [2] y [3])
$Min'$	límite inferior de un rango de pesaje especificado, $Min' > Min$
$R$	indicación (lectura) de un instrumento, que no está relacionada con una carga de ensayo
$R_{\text{min}}$	pesada mínima
$R_{\text{min,SF}}$	pesada mínima para un factor de seguridad $> 1$
$Req$	requisito de usuario para la exactitud relativa de pesada
$T$	temperatura (en K)
$Tol$	valor de tolerancia especificado
$U$	incertidumbre expandida
$U_{\text{gl}}$	incertidumbre expandida global
$W$	resultado de pesada, pesada en el aire
$d$	escalón, diferencia en masa entre dos indicaciones consecutivas del dispositivo indicador
$d_1$	escalón mínimo
$d_T$	escalón efectivo $< d$ , usado en los ensayos de calibración
$g$	aceleración local de la gravedad
$k$	factor de cobertura
$k_s$	factor de ajuste
$m$	masa de un objeto
$m_c$	valor de masa convencional, preferiblemente de un patrón de masa
$m_N$	valor nominal de masa convencional de un patrón de masa
$m_{\text{ref}}$	masa de referencia ("valor verdadero") de una carga de ensayo
$emp$	error máximo permitido (de una indicación, un patrón de masa, etc.) en un contexto dado
$n$	número de elementos, según se indica en cada caso
$p$	presión barométrica
$s$	desviación típica
$t$	temperatura (en °C)

$u$	incertidumbre típica
$u_{\text{rel}}$	incertidumbre típica relativa a una magnitud de base
$\nu$	número de grados de libertad
$\rho$	densidad
$\rho_0$	densidad de referencia del aire, $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$
$\rho_a$	densidad del aire
$\rho_c$	densidad de referencia de un patrón de masa, $\rho_c = 8\,000 \text{ kg/m}^3$

<b>Subíndice</b>	<b>relacionado con</b>
B	empuje del aire (en la calibración)
D	deriva
L	bajo carga
N	valor nominal
St	patrón (masa)
T	ensayo
adj	ajuste
appr	aproximación
buoy	empuje del aire (resultado de pesada)
cal	calibración
conv	convección
corr	corrección
dig	digitalización
ecc	carga descentrada
gl	global
$i, j$	numeración
instr	instrumento de pesaje
max	valor máximo de una población dada
min	valor mínimo de una población dada
proc	procedimiento de pesaje
ref	referencia
rel	relativo
rep	repetibilidad
s	real en el momento del ajuste
sub	carga de sustitución
tare	operación de tara
temp	temperatura
time	tiempo
0	cero, sin carga

## ANEXO E: INFORMACIÓN SOBRE EL EMPUJE DEL AIRE

Este anexo proporciona información adicional sobre la corrección por empuje del aire tratada en el apartado 7.1.2.2.

### E1 Densidad de los patrones de masa

Cuando no se conocen ni la densidad  $\rho$  de un patrón de masa, ni su incertidumbre típica  $u(\rho)$ , pueden usarse los siguientes valores para las pesas de las clases E<sub>2</sub> a M<sub>2</sub> del documento OIML R111 (tomados de [4], Tabla B7).

Aleación/material	Densidad supuesta $\rho$ en kg/m <sup>3</sup>	Incertidumbre típica $u(\rho)$ en kg/m <sup>3</sup>
níquel plata	8 600	85
bronce	8 400	85
acero inoxidable	7 950	70
acero al carbono	7 700	100
hierro	7 800	100
hierro fundido (blanco)	7 700	200
hierro fundido (gris)	7 100	300
aluminio	2 700	65

Para pesas con cavidad de ajuste rellena con una cantidad considerable de material de densidad diferente, [4] proporciona una fórmula para calcular la densidad global de la pesa.

### E2 Empuje del aire para pesas conformes a la recomendación internacional OIML R111

Como se cita en la nota del apartado 7.1.2.2, el documento OIML R 111 establece que la densidad de las pesas debe encontrarse dentro de ciertos límites que están relacionados con el error máximo permitido  $emp$  y una variación específica de la densidad del aire. Los  $emp$  son proporcionales al valor nominal para pesas  $\geq 100$  g. Esto permite una estimación de la incertidumbre relativa  $u_{rel}(\delta m_B)$ . Las fórmulas correspondientes (7.1.2-5c) para el caso en que el instrumento se ajusta inmediatamente antes de la calibración y (7.1.2-5d) para el caso en que el instrumento no se ajusta antes de la calibración, se han evaluado en la tabla E2.1, en relación con las clases de exactitud E<sub>2</sub> a M<sub>1</sub>.

Para las pesas de  $m_N \leq 50$  g, los  $emp$  están tabulados en el documento OIML R111, con el valor relativo  $emp/m_N$  aumentando conforme la masa decrece. Para estas pesas, la tabla E2.1 contiene las incertidumbres típicas absolutas  $u(\delta m_B) = u_{rel}(\delta m_B) m_N$ .

Los valores de la tabla E2.1 pueden usarse para una estimación de la contribución de incertidumbre si no se corrige el empuje del aire en una situación dada.

**Tabla E2.1: Incertidumbre típica de la corrección por empuje del aire para pesas conformes a la recomendación internacional OIML R 111**

Calculadas según el apartado 7.1.2.2, para el caso en que el instrumento se ajuste inmediatamente antes de la calibración (7.1.2-5c),  $u_A$ , y el caso en que el instrumento no se ajuste antes de la calibración (7.1.2-5d),  $u_B$ .

$m_N$ en g	Clase E <sub>2</sub>			Clase F <sub>1</sub>			Clase F <sub>2</sub>			Clase M <sub>1</sub>		
	<i>emp</i> en mg	$u_A$ en mg	$u_B$ en mg	<i>emp</i> en mg	$u_A$ en mg	$u_B$ en mg	<i>emp</i> en mg	$u_A$ en mg	$u_B$ en mg	<i>emp</i> en mg	$u_A$ en mg	$u_B$ en mg
50	0,100	0,014	0,447	0,30	0,043	0,476	1,00	0,14	0,58	3,0	0,43	0,87
20	0,080	0,012	0,185	0,25	0,036	0,209	0,80	0,12	0,29	2,5	0,36	0,53
10	0,060	0,009	0,095	0,20	0,029	0,115	0,60	0,09	0,17	2,0	0,29	0,38
5	0,050	0,007	0,051	0,16	0,023	0,066	0,50	0,07	0,12	1,6	0,23	0,27
2	0,040	0,006	0,023	0,12	0,017	0,035	0,40	0,06	0,08	1,2	0,17	0,19
1	0,030	0,004	0,013	0,10	0,014	0,023	0,30	0,04	0,05	1,0	0,14	0,15
0,5	0,025	0,004	0,008	0,08	0,012	0,016	0,25	0,04	0,04	0,8	0,12	0,12
0,2	0,020	0,003	0,005	0,06	0,009	0,010	0,20	0,03	0,03	0,6	0,09	0,09
0,1	0,016	0,002	0,003	0,05	0,007	0,008	0,16	0,02	0,02	0,5	0,07	0,07
<i>emp</i> relativos e incertidumbres típicas relativas $u_{rel}(\delta m_B)$ en mg/kg para pesas de 100 g y mayores												
$m_N$ en g	Clase E <sub>2</sub>			Clase F <sub>1</sub>			Clase F <sub>2</sub>			Clase M <sub>1</sub>		
	<i>emp</i> /m <sub>N</sub> mg/kg	$u_{rel A}$	$u_{rel B}$	<i>emp</i> /m <sub>N</sub> mg/kg	$u_{rel A}$	$u_{rel B}$	<i>emp</i> /m <sub>N</sub> mg/kg	$u_{rel A}$	$u_{rel B}$	<i>emp</i> /m <sub>N</sub> mg/kg	$u_{rel A}$	$u_{rel B}$
≥ 100	1,60	0,23	8,89	5,00	0,72	9,38	16,0	2,31	11,0	50,0	7,22	15,88

## ANEXO F: EFECTOS DE CONVECCIÓN

En el apartado 4.2.3 se ha explicado, en principio, la generación de un cambio aparente de masa  $\Delta m_{\text{conv}}$  por una diferencia de temperatura  $\Delta T$  entre una pesa y el aire que la rodea. A continuación se presenta información más detallada, para permitir evaluar las situaciones en las que debe tomarse en cuenta el efecto de la convección para obtener la incertidumbre de calibración.

Todos los cálculos en las siguientes tablas se basan en [7]. No se reproducen aquí las fórmulas pertinentes, ni los parámetros a incluir. Solamente se proporcionan las fórmulas principales y las condiciones esenciales.

El problema que se trata aquí es bastante complejo, tanto en la física de base como en la evaluación de los resultados experimentales. No debe sobreestimarse la precisión de los valores que se presentan a continuación.

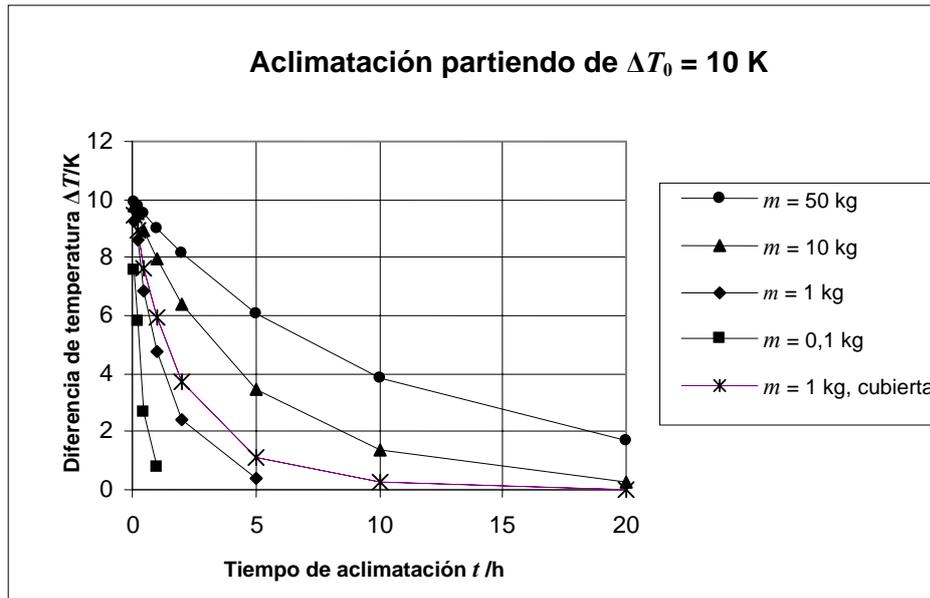
### F1 Relación entre la temperatura y el tiempo

Una diferencia de temperatura inicial  $\Delta T_0$  se reduce con el tiempo  $\Delta t$  por intercambio de calor entre la pesa y el aire que la rodea. La velocidad de intercambio de calor es razonablemente independiente del signo de  $\Delta T_0$  y, por ello, el calentamiento o enfriamiento de una pesa se produce en intervalos de tiempo similares.

La figura F.1.1 proporciona algunos ejemplos del efecto de aclimatación. Partiendo de una diferencia de temperatura inicial de 10 K, se muestra, para cuatro diferentes pesas, la  $\Delta T$  real después de diferentes tiempos de aclimatación. Se supone que las pesas reposan sobre tres columnas, bastante delgadas, de PVC en "aire libre". Para comparación, se muestra también para una pesa de 1 kg descansando sobre las mismas columnas, pero cubierta con una campana que reduce el flujo convectivo del aire, de manera que se requiere entre unas 1,5 y 2 veces el tiempo necesario para conseguir la misma reducción de  $\Delta T$ , sin la campana, para la pesa de 1 kg.

Las referencias se encuentran en [7]: fórmula (21), y los parámetros para los casos 3b y 3c en la tabla 4.

**Figura F1.1: Aclimatación de patrones de masa**



Las tablas F1.2 y F1.3 proporcionan los tiempos de aclimatación  $\Delta t$  que puede ser necesario esperar, si la diferencia de temperatura de las pesas quiere reducirse de un valor  $\Delta T_1$  a un valor inferior  $\Delta T_2$ . Las condiciones de intercambio de calor son las mismas que en la figura F1.1: la tabla F1.2 para "m = 0,1 kg" a "m = 50 kg"; la tabla F1.3 para "m = 1 kg, cubierta".

En condiciones reales, los tiempos de espera pueden ser menores cuando la pesa está directamente sobre una superficie plana de apoyo conductora del calor y pueden ser mayores si la pesa está parcialmente contenida en una caja de pesas.

Las referencias se encuentran en [7]: fórmula (26), y los parámetros para los casos 3b, 3c en la tabla 4.

**Tabla F1.2 Intervalos de tiempo para la reducción por pasos de las diferencias de temperatura**

Pesas descansando sobre tres columnas finas de PVC en aire libre

Tiempo de aclimatación en min para alcanzar $\Delta T$ a partir de la $\Delta T$ inmediatamente superior, caso 3b							
	$\Delta T / K$						
$m/kg$	20 K a 15 K	15 K a 10 K	10 K a 7 K	7 K a 5 K	5 K a 3 K	3 K a 2 K	2 K a 1 K
50	149,9	225,3	212,4	231,1	347,9	298,0	555,8
20	96,2	144,0	135,2	135,0	219,2	186,6	345,5
10	68,3	101,9	95,3	94,8	153,3	129,9	239,1
5	48,1	71,6	66,7	66,1	106,5	89,7	164,2
2	30,0	44,4	41,2	40,6	65,0	54,4	98,8
1	20,8	30,7	28,3	27,8	44,3	37,0	66,7
0,5	14,3	21,0	19,3	18,9	30,0	24,9	44,7
0,2	8,6	12,6	11,6	11,3	17,8	14,6	26,1
0,1	5,8	8,5	7,8	7,5	11,8	9,7	17,2
0,05	3,9	5,7	5,2	5,0	7,8	6,4	11,3
0,02	2,3	3,3	3,0	2,9	4,5	3,7	6,4
0,01	1,5	2,2	2,0	1,9	2,9	2,4	4,2

Ejemplos para una pesa de 1 kg

para reducir  $\Delta T$  de 20 K a 15 K requerirá 20,8 min,

para reducir  $\Delta T$  de 15 K a 10 K requerirá 30,7 min,

para reducir  $\Delta T$  de 10 K a 5 K requerirá 28,3 min + 27,8 min = 56,1 min.

**Tabla F1.3 Intervalos de tiempo para la reducción por pasos de las diferencias de temperatura**

Pesas descansando sobre tres columnas finas de PVC, cubiertas con una campana

Tiempo de aclimatación en min para alcanzar $\Delta T$ a partir de la $\Delta T$ inmediatamente superior, caso 3c							
	$\Delta T / K$						
$m/kg$	20 K a 15 K	15 K a 10 K	10 K a 7 K	7 K a 5 K	5 K a 3 K	3 K a 2 K	2 K a 1 K
50	154,2	235,9	226,9	232,1	388,7	342,7	664,1
20	103,8	158,6	152,4	155,6	260,2	228,9	442,2
10	76,8	117,2	112,4	114,7	191,5	168,1	324,0
5	56,7	86,4	82,8	84,3	140,5	123,1	236,5
2	37,8	57,5	54,9	55,8	92,8	81,0	155,0
1	27,7	42,1	40,1	40,7	67,5	58,8	112,0
0,5	20,2	30,7	29,2	29,6	48,9	42,4	80,5
0,2	13,3	20,1	19,1	19,2	31,7	27,3	51,6
0,1	9,6	14,5	13,7	13,8	22,6	19,5	36,6
0,05	6,9	10,4	9,8	9,9	16,1	13,8	25,7
0,02	4,4	6,7	6,3	6,2	10,2	8,6	16,0
0,01	3,2	4,7	4,4	4,4	7,1	6,0	11,1

## F2 Cambio de la masa aparente

El flujo de aire generado por una diferencia de temperatura  $\Delta T$  se dirige hacia arriba cuando la pesa está más caliente ( $\Delta T > 0$ ) que el aire que la rodea y hacia abajo cuando está más fría ( $\Delta T < 0$ ). El flujo de aire provoca fuerzas de fricción sobre la superficie vertical de la pesa y fuerzas que empujan o tiran de sus superficies horizontales, que resultan en un cambio  $\Delta m_{conv}$  de la masa aparente. El receptor de carga del instrumento también contribuye al cambio, de una manera que todavía no está completamente investigada.

Hay evidencia experimental de que los valores absolutos de los cambios son generalmente menores cuando  $\Delta T < 0$  que cuando  $\Delta T > 0$ . Por ello, es razonable calcular los cambios de masa para los valores absolutos de  $\Delta T$ , utilizando los parámetros para  $\Delta T > 0$ .

La tabla F2.1 proporciona los valores para  $\Delta m_{conv}$  para pesas patrón, para las diferencias de temperatura  $\Delta T$  que aparecen en las tablas F1.2 y F1.3. Se basan en experimentos realizados en un comparador de masa con un dispositivo giratorio para el intercambio automático de pesas dentro de una cámara de vidrio. Como las condiciones que prevalecen durante la calibración de instrumentos de pesaje "normales" son diferentes, los valores de la tabla deben considerarse como estimaciones de los efectos que pueden esperarse en una calibración real.

Las referencias se encuentran en [7]: fórmula (34), y los parámetros para el caso 3d en la tabla 4.

**Tabla F2.1 Cambio en la masa aparente  $\Delta m_{conv}$**

Cambio $\Delta m_{conv}$ en mg de las pesas, para diferencias de temperatura $\Delta T$ seleccionadas								
$m$ en kg	$\Delta T$ en K							
	20	15	10	7	5	3	2	1
50	113,23	87,06	60,23	43,65	32,27	20,47	14,30	7,79
20	49,23	38,00	26,43	19,25	14,30	9,14	6,42	3,53
10	26,43	20,47	14,30	10,45	7,79	5,01	3,53	1,96
5	14,30	11,10	7,79	5,72	4,28	2,76	1,96	1,09
2	6,42	5,01	3,53	2,61	1,96	1,27	0,91	0,51
1	3,53	2,76	1,96	1,45	1,09	0,72	0,51	0,29
0,5	1,96	1,54	1,09	0,81	0,61	0,40	0,29	0,17
0,2	0,91	0,72	0,51	0,38	0,29	0,19	0,14	0,08
0,1	0,51	0,40	0,29	0,22	0,17	0,11	0,08	0,05
0,05	0,29	0,23	0,17	0,12	0,09	0,06	0,05	0,03
0,02	0,14	0,11	0,08	0,06	0,05	0,03	0,02	0,01
0,01	0,08	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01

Los valores de esta tabla pueden compararse con la incertidumbre de calibración, o con la tolerancia de las pesas patrón que se utilizan en una calibración, para valorar si un valor de  $\Delta T$  real puede producir un cambio significativo de la masa aparente.

Como ejemplo, la tabla F2.2 da las diferencias de temperatura que previsiblemente producirán, para pesas conformes al documento OIML R 111,

valores de  $\Delta m_{\text{conv}}$  que no superen ciertos límites. La comparación se basa en la tabla F2.1.

Los límites considerados son los errores máximos permitidos, o  $1/3$  de ellos.

Se observa que, con estos límites, el efecto de la convección solamente es relevante para las pesas de clases  $F_1$  del documento OIML R111 o mejores.

**Tabla F2.2 Límites de temperatura para valores específicos de  $\Delta m_{\text{conv}}$**

$\Delta T_A$  = diferencia de temperatura para  $\Delta m_{\text{conv}} \leq emp$

$\Delta T_B$  = diferencia de temperatura para  $\Delta m_{\text{conv}} \leq emp/3$

Diferencias $\Delta T_A$ para $\Delta m_{\text{conv}} \leq emp$ y $\Delta T_B$ para $\Delta m_{\text{conv}} \leq emp/3$						
	Clase $E_2$			Clase $F_1$		
$m_N$ en kg	<i>emp</i> en mg	$\Delta T_A$ en K	$\Delta T_B$ en K	<i>emp</i> en mg	$\Delta T_A$ en K	$\Delta T_B$ en K
50	75	12	4	250	>20	12
20	30	11	3	100	>20	11
10	15	10	3	50	>20	10
5	7,5	10	3	25	>20	10
2	3	9	1	10	>20	9
1	1,5	7	1	5	>20	7
0,5	0,75	6	1	2,5	>20	6
0,2	0,30	5	1	1,0	>20	5
0,1	0,15	4	1	0,50	>20	4
0,05	0,10	6	1	0,30	>20	6
0,02	0,08	10	2	0,25	>20	10
0,01	0,06	15	3	0,20	>20	15

## ANEXO G: PESADA MÍNIMA

La pesada mínima es la cantidad mínima de muestra necesaria para que una pesada consiga una exactitud relativa de pesada especificada [13].

Por consiguiente, cuando se pesa una cantidad que representa la pesada mínima,  $R_{\min}$ , la incertidumbre de medida relativa de la pesada es igual a la exactitud de pesada relativa requerida,  $Req$ , de forma que

$$\frac{U(R_{\min})}{R_{\min}} = Req \quad (G-1)$$

De aquí se obtiene la relación siguiente, que describe la pesada mínima

$$R_{\min} = \frac{U(R_{\min})}{Req} \quad (G-2)$$

Es una práctica generalizada que los usuarios establezcan requisitos específicos sobre el comportamiento de un instrumento (especificaciones de requisitos de usuario). Normalmente definen límites superiores para los valores de incertidumbre de medida que son aceptables para una aplicación de pesada determinada. Coloquialmente los usuarios mencionan exactitud del proceso de pesada o requisitos de tolerancia de pesada. Muy frecuentemente, los usuarios también tienen que cumplir con reglamentaciones que estipulan el cumplimiento de un requisito determinado sobre la incertidumbre de medida. Normalmente, estos requisitos se indican como valores relativos, por ejemplo cumplimiento de una incertidumbre de medida de 0,1 %.

Para los instrumentos de pesaje, se suele utilizar la incertidumbre global para determinar si el instrumento cumple unos determinados requisitos de usuario.

La incertidumbre global suele quedar aproximada por la ecuación lineal (7.5.2-3e)

$$U_{gl}(W) \approx U(W=0) + \left\{ \frac{U(W=Max) - U(W=0)}{Max} \right\} R + |a_1| R = \alpha_{gl} + \beta_{gl} \cdot R \quad (G-3)$$

La incertidumbre global relativa es, por lo tanto, una función hiperbólica y está definida por

$$U_{gl,rel}(W) = \frac{U_{gl}(W)}{R} = \frac{\alpha_{gl}}{R} + \beta_{gl} \quad (G-4)$$

Para un determinado requisito de exactitud,  $Req$ , solamente las pesadas con

$$U_{gl,rel}(W) \leq Req \quad (G-5)$$

cumplen los respectivos requisitos de usuario. Por consiguiente, solamente las pesadas con una lectura de

$$R \geq \frac{\alpha_{gl}}{Req - \beta_{gl}} \quad (G-6)$$

tienen una incertidumbre de medida relativa inferior al requisito específico establecido por el usuario y son, por tanto, aceptables. El valor límite, es decir, el menor resultado de pesada que satisface el requisito de usuario es

$$R_{\min} = \frac{\alpha_{gl}}{Req - \beta_{gl}} \quad (G-7)$$

y se llama pesada mínima. Basándose en este valor, el usuario es capaz de definir procedimientos normalizados de trabajo adecuados que aseguran que las pesadas que realiza usando el instrumento, cumplen con el requisito de pesada mínima, es decir que solamente pesa cantidades que tengan una masa mayor que la pesada mínima.

Como la incertidumbre de medida en uso puede ser difícil de estimar debido a factores ambientales tales como altos niveles de vibración, corrientes de aire, influencias inducidas por el operador, etc., o debidas a influencias específicas de la aplicación de pesada, tales como muestras cargadas electrostáticamente, agitadores magnéticos, etc., usualmente se aplica un factor de seguridad.

El factor de seguridad  $SF$  es un número mayor que uno, por el que se divide el requisito de usuario  $Req$ . El objetivo es asegurar que la incertidumbre de medida relativa global sea menor o igual que el requisito de usuario  $Req$ , dividido por el factor de seguridad. Esto asegura que los efectos ambientales, o los efectos debidos a una aplicación particular de pesada, que tienen un efecto importante en la medición y que podrían, por tanto, aumentar la incertidumbre de medida de pesada más allá del nivel estimado por la incertidumbre global, todavía permitan (con un alto grado de seguridad) que se cumpla el requisito de usuario  $Req$ .

$$U_{gl,rel}(W) \leq Req / SF \quad (G-8)$$

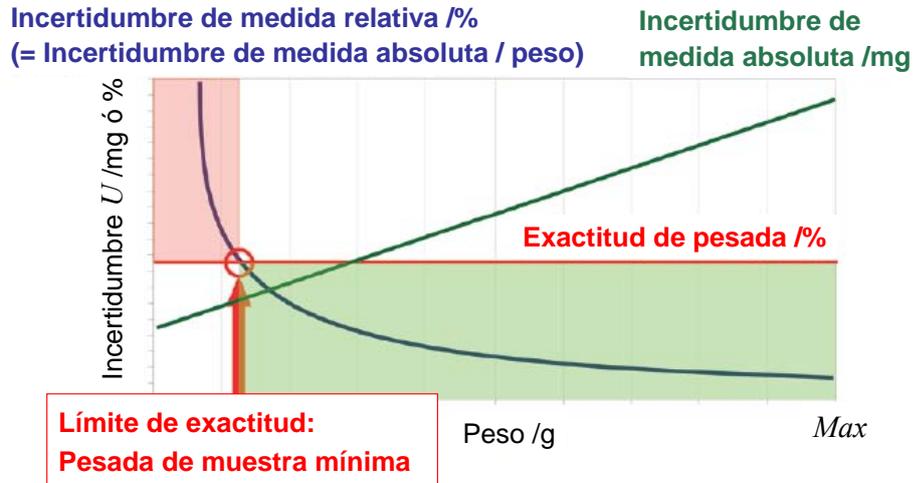
Por consiguiente, la pesada mínima basada en el factor de seguridad puede calcularse como

$$R_{\min,SF} = \frac{\alpha_{gl} \cdot SF}{Req - \beta_{gl} \cdot SF} \quad (G-9)$$

El usuario tiene la responsabilidad de definir el factor de seguridad dependiendo del grado en que los efectos ambientales y la aplicación de pesada específica puedan influir sobre la incertidumbre de medida.

Debe tenerse en cuenta que la pesada mínima se refiere al peso neto (peso de muestra) que se pesa en el instrumento, es decir, no debe tenerse en cuenta la masa del recipiente de tara para cumplir con el requisito de usuario  $Req$ . Por ello, la pesada mínima es designada frecuentemente como "pesada de muestra mínima".

**Figura G.1: Incertidumbre de medida**



La incertidumbre de medida absoluta de un instrumento de pesaje se representa mediante una línea verde y la relativa mediante una línea azul. El límite de exactitud del instrumento, llamado pesada mínima, es el punto de intersección entre la incertidumbre de medida relativa y la exactitud de pesada requerida.

## ANEXO H: EJEMPLOS

Los ejemplos mostrados en el presente anexo muestran, de diferentes maneras, cómo pueden aplicarse de manera correcta, las instrucciones contenidas en la presente guía. No se pretende mostrar ningún tipo de preferencia de unos procedimientos sobre otros para los cuales no se presenta ningún ejemplo.

En el caso de que un laboratorio de calibración desee proceder conforme a alguno de los ejemplos, puede hacer referencia a ello en su manual de calidad y en cualquiera de los certificados que emita.

Los ejemplos H1, H2 y H3 proporcionan una aproximación básica a la determinación del error e incertidumbres de calibración. El ejemplo H4 proporciona una aproximación más sofisticada.

Nota 1: El certificado debería contener toda la información mostrada en Hn.1, en la medida en que se conozca y, en la medida que sea aplicable, al menos lo que figura en negrita en Hn.2 y Hn.3, siendo Hn = H1, H2...

Nota 2: Los resultados de los ejemplos se muestran con más dígitos de los que deberían aparecer en un certificado de calibración con fines ilustrativos.

Nota 3: Para el caso de distribuciones de probabilidad rectangulares se asumen infinitos grados de libertad.

### **H1 Instrumento de 220 g de capacidad y 0,1 mg de escalón**

#### **Nota preliminar:**

Se muestra la calibración de una balanza analítica. El ejemplo muestra el procedimiento estándar completo para la presentación de los resultados de medida e incertidumbres asociadas, tal y como se lleva a cabo por la mayoría de los laboratorios. Como opción 2 (en cursiva) se presenta un método alternativo para tener en cuenta los efectos del empuje del aire y los efectos de convección.

**Primera situación: Ajuste de la sensibilidad realizada independientemente de la calibración.**

**H1.1/A Condiciones específicas de la calibración**

<b>Instrumento:</b>	<b>Instrumento de pesaje electrónico, descripción e identificación</b>
<b>Alcance máximo <i>Max/</i> escalón <i>d</i></b>	<b>220 g / 0,1 mg</b>
Coeficiente de temperatura	$K_T = 1,5 \times 10^{-6}/K$ (manual del fabricante); solamente es necesario para calcular la incertidumbre del resultado de una pesada.
Dispositivo de ajuste interno	Actúa automáticamente después del encendido de la balanza y cuando $\Delta T \geq 3$ K. Solamente es necesario para calcular la incertidumbre del resultado de una pesada. Estado: activado.
<b>Ajuste por operador</b>	<b>No se ajusta inmediatamente antes de la calibración.</b>
<b>Temperatura durante la calibración</b>	<b>21 °C medida al principio de la calibración.</b>
<i>Presión barométrica y humedad (opcional)</i>	990 hPa, 50 % RH.
Condiciones ambientales	Variación máxima de temperatura 5 K (sala sin ventanas). Si se emplea para el cálculo de la incertidumbre por empuje del aire según la fórmula 7.1.2-5e, se debe indicar en el certificado de calibración. No es relevante para la incertidumbre del resultado de una pesada, cuando el dispositivo de ajuste interno está activado ( $\Delta T \geq 3$ K). En este caso la variación máxima de temperatura para la estimación de la incertidumbre del resultado de una pesada es de 3 K.
<b>Cargas de ensayo/</b> aclimatación	<b>Pesas patrón, clase E<sub>2</sub></b> , aclimatadas a la temperatura ambiente ( <i>en la opción 2 se tiene en cuenta una diferencia de temperatura de 2 K con relación a la temperatura ambiente</i> ).

**H1.2/A Ensayos y resultados**

<b>Repetibilidad</b>	<b>Carga de ensayo 100 g (aplicada 5 veces)</b>
Requisitos establecidos en el apartado <b>5.1</b> .  Indicación sin carga se ajusta a cero cuando sea necesario; lecturas registradas.	100,000 6 g
	100,000 3 g
	100,000 5 g
	100,000 4 g
	100,000 5 g
<b>Desviación típica</b>	<b><math>s = 0,00011</math> g</b>

<b>Excentricidad</b>	<b>Posición de la carga</b>	<b>Carga de ensayo 100 g</b>
Requisitos establecidos en el apartado <b>5.3</b> .  Indicación puesta a cero antes del ensayo; carga situada primero en el centro y posteriormente desplazada a las otras posiciones.	Centro	100,000 6 g
	Frontal izquierda	100,000 4 g
	Trasera izquierda	100,000 5 g
	Trasera derecha	100,000 7 g
	Frontal derecha	100,000 5 g
<b>Máxima desviación</b>	$ \Delta I_{\text{ecc}} _{\text{max}}$	<b>0,000 2 g</b>

**Errores de indicación:**

Prerrequisitos generales: Requisitos establecidos en el apartado 5.2, pesas distribuidas de manera suficientemente uniforme dentro del rango de medida.  
Las cargas de ensayo se aplican de una vez; cargas discontinuas solamente crecientes, la indicación sin carga se ajusta a cero si es necesario.

Opción 1: Densidad del aire desconocida durante el ajuste y durante la calibración (es decir, no se aplica corrección por empuje del aire a los valores del error de indicación)

<b>Carga <math>m_{\text{ref}}</math></b>	<b>Indicación <math>I</math></b>	<b>Error de indicación <math>E</math></b>
0,0000 g	0,000 0 g	0,000 0 g
50,0000 g	50,000 4 g	0,000 4 g
99,9999 g	100,000 6 g	0,000 7 g
149,9999 g	150,000 9 g	0,001 0 g
220,0001 g	220,001 4 g	0,001 3 g

Opción 2: Densidad del aire  $\rho_{\text{as}}$  desconocida durante el ajuste y densidad del aire  $\rho_{\text{aCal}}$  durante la calibración, calculada de acuerdo a la fórmula simplificada del CIPM (A1.1-1)

Valores medidos empleados para el cálculo:

Presión barométrica  $p$ : 990 hPa

Humedad relativa RH: 50 %RH

Temperatura  $t$ : 21 °C

Densidad del aire  $\rho_{\text{aCal}}$ : 1,173 kg/m<sup>3</sup>

Corrección por empuje del aire  $\delta m_{\text{B}}$  de acuerdo a la fórmula (4.2.4-4).

Valores numéricos empleados para el cálculo:

Densidad de la masa de referencia  $\rho_{\text{cal}}$ : (7 950 ± 70) kg/m<sup>3</sup>

Corrección por empuje del aire  $\delta m_{\text{B}}$ : 2,138 x 10<sup>-8</sup>  $m_{\text{ref}}$

*La corrección por empuje del aire calculada  $\delta m_B$  de  $m_{\text{ref}}$  de la carga  $L$  siguiendo la fórmula (4.2.4-4) es despreciable en tanto que la resolución relativa del instrumento es del orden de  $10^{-6}$  y, por tanto, mucho mayor que la corrección por empuje del aire. La tabla superior lo demuestra.*

### **H1.3/A Errores e incertidumbres relativas (balance de incertidumbres asociadas)**

Condiciones comunes para ambas opciones:

- La incertidumbre en el cero resulta únicamente del escalón  $d_0$  y de la repetibilidad  $s$ .
- El ensayo de excentricidad se tiene en cuenta para la calibración de acuerdo a (7.1.1-10).
- El valor de masa convencional de las pesas de ensayo (clase  $E_2$ ) se tiene en cuenta en los resultados de calibración. Por tanto,  $U(\delta m_c) = U/k$  se calcula de acuerdo a la fórmula (7.1.2-2).
- La deriva de las pesas se ha monitorizado estadísticamente y el factor  $k_D$  de la fórmula (7.1.2-11) elegido ha sido 1,25.
- Los grados de libertad para el cálculo del factor de cobertura  $k$ , se obtienen siguiendo el anexo B3 y la tabla G.2 de [1]. En el caso del ejemplo, la influencia de la incertidumbre del ensayo de repetibilidad con 5 medidas es significativa.
- La información acerca de la incertidumbre relativa  $U(E)_{\text{rel}} = u(E)/L$  no es obligatoria, pero ayuda a demostrar las características de las incertidumbres.

#### Balance de incertidumbres para la opción 1 (no se aplica corrección por empuje del aire al error de indicación)

Condición adicional:

La balanza no se ajusta inmediatamente antes de la calibración. Se aplica el procedimiento de acuerdo a la opción 1, sin información acerca de la densidad del aire. Por tanto, se aplica la fórmula (7.1.2-5d) para la determinación de la incertidumbre por empuje del aire. Como alternativa en la tabla, se emplea la fórmula (7.1.2-5e), asumiendo de ese modo una variación de la temperatura durante el uso de 5 K.

Magnitud o influencia	Carga, indicación y error en g					Fórmula
	Incertidumbres en g					
Carga $m_{ref}$ /g	0,000 0	50,000 0	99,999 9	149,999 9	220,000 1	
Indicación $I$ /g	0,000 0	50,000 4	100,000 6	150,000 9	220,001 4	
Error de indicación $E$ /g	0,000 0	0,000 4	0,000 7	0,001 0	0,001 3	7.1-1
Repetibilidad $u(\delta I_{rep})$ /g	0,000 114					7.1.1-5
Resolución $u(\delta I_{dig0})$ /g	0,000 029					7.1.1-2a
Resolución $u(\delta I_{digL})$ /g	0,000 000	0,000 029				7.1.1-3a
Excentricidad $u(\delta I_{ecc})$ /g	0,000 000	0,000 029	0,000 058	0,000 087	0,000 127	7.1.1-10
Incertidumbre de la indicación $u(I)$ /g	0,000 118	0,000 124	0,000 134	0,000 149	0,000 175	7.1.1-12
Cargas de ensayo $m_c$ /g	0,000 0	50,000 0	99,999 9	99,999 9 50,000 0	200,000 1 20,000 0	
Masa convencional $u(\delta m_c)$ /g	0,000 000	0,000 015	0,000 025	0,000 040	0,000 062	7.1.2-2
Deriva $u(\delta m_D)$ /g	0,000 000	0,000 022	0,000 036	0,000 058	0,000 089	7.1.2-11
Empuje del aire $u(\delta m_B)$ /g	0,000 000	0,000 447	0,000 889	0,001 330	0,001 960	7.1.2-5d / Tabla E2.1
Convección $u(\delta m_{conv})$ /g	En este caso irrelevante (Las pesas están aclimatadas).					7.1.2-13
Incertidumbre de las masas patrón $u(m_{ref})$ /g	0,000 000	0,000 448	0,000 890	0,001 332	0,001 963	7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E)$ /g	0,000 118	0,000 465	0,000 900	0,001 340	0,001 971	7.1.3-1a
$\nu_{eff}$ (grados efectivos de libertad)	4	1104	15538	76345	357098	B3-1
<b><math>k</math> (95,45 %)</b>	<b>2,87</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E)</math> /g</b>	<b>0,000 34</b>	<b>0,000 93</b>	<b>0,001 80</b>	<b>0,002 68</b>	<b>0,003 94</b>	7.3-1
$U_{rel}(E)$ /%	----	0,001 86	0,001 80	0,001 79	0,001 79	
<i>Alternativa: Incertidumbre debida al empuje del aire calculada según la fórmula (7.1.2-5e) en vez de según (7.1.2-5d), es decir, sustituyendo la aproximación, en el peor de los casos, por un valor derivado de la estimación de la variación de la temperatura de la sala durante el uso, de 5 K.</i>						
Empuje del aire $u(\delta m_B)$ /g	0,000 000	0,000 103	0,000 201	0,000 304	0,000 446	7.1.2-5e
Incertidumbre de las masas patrón $u(m_{ref})$ /g	0,000 000	0,000 107	0,000 205	0,000 312	0,000 459	7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E)$ /g	0,000 118	0,000 164	0,000 245	0,000 346	0,000 491	7.1.3-1a
$\nu_{eff}$ (grados efectivos de libertad)	4	17	85	338	1377	B3-1
<b><math>k</math> (95,45 %)</b>	<b>2,87</b>	<b>2,16</b>	<b>2,03</b>	<b>2,01</b>	<b>2,00</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E)</math> /g</b>	<b>0,000 34</b>	<b>0,000 35</b>	<b>0,000 50</b>	<b>0,000 69</b>	<b>0,000 98</b>	7.3-1
$U_{rel}(E)$ /%	----	0,000 70	0,000 50	0,000 46	0,000 45	

En este ejemplo se observa que la incertidumbre de las masas patrón se reduce de manera significativa, si la contribución a la incertidumbre por empuje del aire tenida en cuenta, se calcula a partir de los cambios de temperatura de la sala estimados durante el uso, en vez de usando la aproximación más conservadora dada por (7.1.2-5d).

Sería aceptable declarar en el certificado, solamente, el valor máximo de la

incertidumbre expandida para todos los errores declarados:  $U(E) = 0,003\ 94\ \text{g}$  (o de manera alternativa  $0,000\ 98\ \text{g}$ ), basada en  $k = 2,00$ , acompañada de la declaración de que la probabilidad de cobertura es de al menos el 95 %.

El certificado advertirá al usuario de que la incertidumbre expandida declarada en el certificado, sólo es aplicable, cuando se tiene en cuenta el error ( $E$ ).

Balance de incertidumbres para la opción 2 (corrección por empuje del aire aplicada a los valores del error de indicación)

*Condición adicional:*

*La balanza no se ajusta inmediatamente antes de la calibración. El procedimiento se aplica, de acuerdo a la opción 2, teniendo en cuenta la determinación de la densidad del aire y la corrección por empuje del aire. Por tanto, se aplica la fórmula (7.1.2-5a) para la determinación de la incertidumbre debida al empuje del aire.*

*Para la opción 2 se ha comprobado que la corrección por empuje del aire  $\delta m_B$  es despreciable dado que es más pequeña que la resolución relativa del instrumento, de todas maneras se muestra el resultado del cálculo en la tabla inferior. Ahora, la incertidumbre asociada a la corrección por empuje del aire  $u(\delta m_B)$  se calcula empleando la fórmula (7.1.2-5a). Nótese que la densidad del aire durante el ajuste (que tuvo lugar independientemente de la calibración) es desconocida, por lo tanto, la variación de la densidad del aire en el tiempo, se toma como una estimación para la incertidumbre. Consecuentemente, la incertidumbre de la densidad del aire se obtiene basándose en estimaciones de las variaciones de la presión, la temperatura y la humedad que pueden ocurrir en el emplazamiento del instrumento.*

*El anexo A3 proporciona indicaciones para estimar la incertidumbre de la densidad del aire. El ejemplo utiliza una aproximación de la incertidumbre basada en (A3-2) en vez de la ecuación general (A3-1), es decir, con la temperatura como único parámetro variable.*

*Para una variación de temperatura de 5 K, el cálculo empleando la aproximación dada por la fórmula (A3-2) conduce a una incertidumbre relativa de  $u(\rho_a)/\rho_a = 1,18 \times 10^{-2}$ , que, para una densidad del aire en calibración de  $\rho_a = 1,173\ \text{kg/m}^3$ , implica una incertidumbre  $u(\rho_a) = 0,014\ \text{kg/m}^3$ . El mismo resultado se puede obtener si se utiliza la fórmula exacta para la incertidumbre de la densidad del aire (A3-1).*

*Para calcular la incertidumbre relativa de la corrección por empuje del aire se tienen en cuenta los siguientes valores numéricos, empleando la fórmula (7.1.2-5a):*

$$\text{Densidad del aire } \rho_{a\text{Cal}}: (1,173 \pm 0,014)\ \text{kg/m}^3$$

$$\text{Densidad de la masa de referencia } \rho_{\text{Cal}}: (7\ 950 \pm 70)\ \text{kg/m}^3$$

*La fórmula (7.1.2-5a) conduce a una incertidumbre relativa de la corrección por empuje del aire de  $u_{\text{rel}}(\delta m_B) = 3,203 \times 10^{-8}$ .*

*La incertidumbre relativa de la corrección por empuje del aire es despreciable comparada con las otras contribuciones a la incertidumbre de la masa de referencia, de todas formas se muestra el resultado del cálculo en la tabla*

inferior.

Este ejemplo muestra que la corrección calculada del error  $\delta m_B$  y la incertidumbre relativa de la corrección por empuje del aire calculada  $u(\delta m_B)$  son ambas despreciables. Esto conduce a una actualización del balance de incertidumbres.

Se muestra la incertidumbre asociada a los efectos de convección debidos a la no aclimatación de las pesas  $u(\delta m_{conv})$  para una diferencia de temperatura de 2 K. El resto de las contribuciones a la incertidumbre son las mismas de la tabla superior y no se repiten en la tabla inferior.

Magnitud o influencia	Carga, indicación y error en g					Fórmula
	Incertidumbres en g					
<b>Carga <math>m_{ref}</math> /g</b>	<b>0,000 0</b>	<b>50,000 0</b>	<b>99,999 9</b>	<b>149,999 9</b>	<b>220,000 1</b>	
Corrección $\delta m_B$ /g	0,000 0	0,000 001	0,000 002	0,000 003	0,000 005	4.2.4.3
<b>Indicación <math>I</math> /g</b>	<b>0,000 0</b>	<b>50,000 4</b>	<b>100,000 6</b>	<b>150,000 9</b>	<b>220,001 4</b>	
<b>Error de indicación <math>E</math> /g</b>	<b>0,000 0</b>	<b>0,000 4</b>	<b>0,000 7</b>	<b>0,001 0</b>	<b>0,001 3</b>	7.1-1
Empuje del aire $u(\delta m_B)$ /g	0,000 0	0,00000 2	0,000 003	0,000 005	0,000 007	7.1.2-5a
Convección $u(\delta m_{conv})$ /g	0,000 0	0,000 029	0,000 046	0,000 075	0,000 092	7.1.2-13 / Tabla F2.1
Incertidumbre de las masas patrón $u(m_{ref})$ /g	0,000 0	0,000 039	0,000 064	0,000 103	0,000 143	7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E)$ /g	0,000 118	0,000 130	0,000 149	0,000 181	0,000 226	7.1.3-1a
$\nu_{eff}$ (grados efectivos de libertad)	4	6	11	25	62	B3-1
<b><math>k</math> (95,45 %)</b>	<b>2,87</b>	<b>2,52</b>	<b>2,25</b>	<b>2,11</b>	<b>2,05</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E)</math> /g</b>	<b>0,000 34</b>	<b>0,000 33</b>	<b>0,000 33</b>	<b>0,000 38</b>	<b>0,000 46</b>	7.3-1
$U_{rel}(E)$ /%	-----	0,000 66	0,000 33	0,000 25	0,000 21	

En este ejemplo se puede ver que la contribución por empuje del aire a la incertidumbre típica es significativa cuando se emplea la aproximación más conservadora de acuerdo con la fórmula (7.1.2-5d).

Si se dispone de información acerca de las variaciones estimadas de temperatura en la sala durante el uso y la incertidumbre de la corrección por empuje del aire se calcula de acuerdo a la fórmula (7.1.2-5e), la diferencia en la incertidumbre del error es menos significativa.

#### H1.4/A Incertidumbre del resultado de una pesada (para la opción 1)

Tal y como se declara en el apartado 7.4, la información descrita a continuación puede ser desarrollada por el laboratorio de calibración o por el usuario del instrumento. Los resultados no deben presentarse como parte del certificado de calibración excepto para el caso del error de indicación aproximado y la incertidumbre del error aproximado que pueden formar parte del certificado de calibración. Usualmente, la información relativa a la incertidumbre del resultado de una pesada se presenta como un anexo del certificado de calibración o, en todo caso, se muestra de modo claramente separado de los resultados de

calibración.

Las condiciones normales de uso del instrumento, asumidas o especificadas por el usuario, pueden incluir:

Ajuste interno del instrumento disponible y activado ( $\Delta T \geq 3$  K).

Variación de la temperatura ambiente  $\Delta T = 5$  K.

Función de tara de la balanza operativa.

Cargas no siempre centradas cuidadosamente.

La incertidumbre del resultado de una pesada se obtiene empleando una aproximación lineal del error de indicación de acuerdo a (C2.2-16).

La incertidumbre del resultado de una pesada se presenta solamente para la opción 1 (no se emplea la corrección por empuje del aire a los valores del error de indicación). El error de indicación aproximado por (C2.2-16) y la incertidumbre del error de indicación aproximado por (C2.2-16d) difieren de manera insignificante entre ambas opciones dado que los factores de ponderación  $p_j = 1/u^2(E_j)$  difieren del orden de unas pocas partes por millón, y los errores de indicación son los mismos para ambas opciones (corrección por empuje del aire inferior a la resolución del instrumento).

Las designaciones  $R$  y  $W$  se introducen para diferenciarlas de la indicación del instrumento de pesaje  $I$  durante la calibración.

$R$ : Lectura obtenida cuando se coloca una carga sobre el instrumento después de su calibración.

$W$ : Resultado de la pesada

Nótese que en la siguiente tabla la lectura  $R$  y todos los resultados están en g.

Magnitud o influencia	Lectura, resultado de la pesada y error en g Incertidumbres en g o como valor relativo	Fórmula
Error de la indicación $E_{\text{appr}}(R)$ para lecturas brutas o netas: Aproximación por una línea recta que pasa por el cero	$E_{\text{appr}}(R) = 6,709 \times 10^{-6} R$	C2.2-16
<b>Incertidumbre del error de indicación aproximado</b>		
Incertidumbre típica del error $u(E_{\text{appr}})$	$u^2(E_{\text{appr}}) = 4,501 \times 10^{-11} u^2(R) + 1,543 \times 10^{-12} R^2$ <sup>10</sup>	C2.2-16d
Incertidumbre típica del error, despreciando el término independiente	$u(E_{\text{appr}}) = 1,242 \times 10^{-6} R$	
<b>Incertidumbres debidas a la influencia de las condiciones ambientales</b>		
Deriva térmica de la sensibilidad	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{temp}}) = 1,299 \times 10^{-6}$	7.4.3-1
Empuje del aire	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{buoy}}) = 1,636 \times 10^{-6}$	7.4.3-4
Cambio en el comportamiento debido a la deriva	Irrelevante en este caso (Ajuste interno activado y deriva entre calibraciones insignificante).	7.4.3-5
<b>Incertidumbres debidas al uso del instrumento</b>		
Operación de tara de la balanza	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{Tare}}) = 1,072 \times 10^{-6}$	7.4.4 7.4.4-5
Deriva bajo carga, histéresis (duración de la carga)	Irrelevante en este caso (corta duración de la carga).	7.4.4-9a/b
Carga descentrada	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = 1,155 \times 10^{-6}$	7.4.4-10
<b>Incertidumbre del resultado de una pesada</b>		
Incertidumbre típica, correcciones a aplicar a las lecturas $E_{\text{appr}}$	$u(W) = \sqrt{(1,467 \times 10^{-8} \text{ g}^2 + 8,390 \times 10^{-12} R^2)}$	7.4.5-1a 7.4.5-1b
Incertidumbre expandida, correcciones a aplicar a las lecturas	$U(W) = 2\sqrt{(1,467 \times 10^{-8} \text{ g}^2 + 8,390 \times 10^{-12} R^2)}$	7.5.-2b
Simplificación al primer orden	$U(W) \approx 2,422 \times 10^{-4} \text{ g} + 4,796 \times 10^{-6} R$	7.5.2-3d
<b>Incertidumbre global del resultado de una pesada sin corrección de las indicaciones</b>		
$U_{\text{gl}}(W) = U(W) +  E_{\text{appr}}(R) $	$U_{\text{gl}}(W) \approx 2,422 \times 10^{-4} \text{ g} + 1,150 \times 10^{-5} R$	7.5.2-3a 7.5.2-3e

La condición relativa al valor chi-cuadrado observado siguiendo (C2.2-2a) fue comprobada con resultado positivo. La primera regresión lineal tiene en cuenta los factores de ponderación  $p'_j$ , de acuerdo a la ecuación (C2.2-18b).

Basado en la incertidumbre global, el valor de pesada mínima del instrumento se puede obtener tal y como se indica en el anexo G.

<sup>10</sup>El primer término es despreciable ya que la incertidumbre de la indicación  $u(R)$  está en el orden de algunos g. Por tanto, el primer término está en el orden de  $10^{-7} \text{ g}^2$  mientras que el segundo término representa valores hasta  $15 \text{ g}^2$ .

Ejemplo:

Requisito de tolerancia de pesada: 1 %

Factor de seguridad: 3

La pesada mínima de acuerdo a la fórmula (G-9), empleando la ecuación mostrada anteriormente para la incertidumbre global es de 0,072 9 g; es decir, el usuario debe pesar una cantidad neta de material que exceda de 0,072 9 g para obtener una incertidumbre de medida relativa (global) para un requisito de tolerancia de pesada del 1 % y un factor de seguridad de 3 (equivalente a una tolerancia relativa de pesada de 0,33 %).

**Segunda situación: Ajuste de la sensibilidad efectuado inmediatamente antes de la calibración**

**H1.1/B Condiciones específicas de la calibración**

<b>Instrumento:</b>	<b>Instrumento de pesaje electrónico, descripción e identificación</b>
<b>Alcance máximo Max/ escalón <i>d</i></b>	<b>220 g / 0,000 1 g</b>
Coeficiente de temperatura	$K_T = 1,5 \times 10^{-6}/K$ (manual del fabricante) Solamente es necesario para el cálculo de la incertidumbre del resultado de una pesada.
Dispositivo de ajuste interno	Actúa automáticamente: después del encendido de la balanza y cuando $\Delta T \geq 3$ K. Solamente es necesario para el cálculo de la incertidumbre del resultado de una pesada. Estado: activado.
<b>Ajuste por el operador</b>	<b>Ajustado inmediatamente antes de la calibración (ajuste con pesas internas).</b>
<b>Temperatura durante la calibración</b>	<b>21 °C medidos al principio de la calibración.</b>
<i>Presión barométrica y humedad (opcional)</i>	990 hPa, 50 % RH.
Condiciones ambientales	Variación máxima de temperatura 5 K (sala del laboratorio sin ventanas). Irrelevante, cuando el dispositivo de ajuste interno está activado ( $\Delta T \geq 3$ K). En este caso la variación máxima de la temperatura para la estimación de la incertidumbre del resultado de una pesada es 3 K.
<b>Cargas de ensayo / Aclimatación</b>	<b>Pesas patrón, clase E<sub>2</sub></b> , aclimatadas a la temperatura ambiente (de manera alternativa se tiene en cuenta una diferencia de temperatura con relación a la temperatura de la sala de 2 K).

## H1.2/B Ensayos y resultados

Opción 1: Densidades del aire desconocidas durante el ajuste/calibración (es decir, no se aplica corrección por empuje del aire al error de los valores de indicación)

Se omite el ensayo de repetibilidad y se tienen en cuenta los resultados de la primera calibración. También se omite el ensayo de excentricidad y se tienen en cuenta los resultados de la primera calibración. Esto se puede hacer ya que sólo se ha ajustado la sensibilidad de la balanza y, por tanto, se puede estimar que no tiene ninguna influencia, ni en la repetibilidad, ni en la excentricidad. No se calcula la densidad del aire.

<b>Errores de la indicación</b> Requisitos indicados en el apartado 5.2, pesas distribuidas prácticamente uniformemente	Cargas de ensayo aplicadas una vez; cargas discontinuas solamente crecientes, indicación sin carga ajustada a cero cuando es necesario. Indicaciones registradas:	
<b>Carga <math>m_{\text{ref}}</math></b>	<b>Indicación <math>I</math></b>	<b>Error de indicación <math>E</math></b>
0,000 0 g	0,000 0 g	0,000 0 g
50,000 0 g	50,000 0 g	0,000 0 g
99,999 9 g	99,999 8 g	- 0,000 1 g
149,999 9 g	149,999 9 g	0,000 0 g
220,000 1 g	220,000 0 g	- 0,000 1 g

Opción 2: La densidad del aire  $\rho_{\text{as}}$  durante el ajuste y densidad del aire  $\rho_{\text{aCal}}$  durante la calibración son idénticas dado que el ajuste se efectuó inmediatamente antes de la calibración.

La densidad del aire se calcula de acuerdo a la fórmula simplificada del CIPM (A1.1-1)

Valores medidos empleados para el cálculo:

Presión barométrica $p$ :	990 hPa
Humedad relativa RH:	50 %
Temperatura $t$ :	21 °C
Densidad $\rho_s$ y $\rho_{\text{Cal}}$ :	(7 950 ± 70) kg/m <sup>3</sup>
Densidad del aire $\rho_{\text{aCal}}$ :	1,173 kg/m <sup>3</sup>

Corrección por empuje del aire  $\delta m_B$  calculada de acuerdo con la fórmula (4.2.4-4).

Valores numéricos empleados para el cálculo:

Densidad de las masas de referencia $\rho_{\text{Cal}}$ :	(7 950 ± 70) kg/m <sup>3</sup>
Corrección por empuje del aire $\delta m_B$ :	2,138 x 10 <sup>-8</sup> $m_{\text{ref}}$

La corrección por empuje del aire calculada  $\delta m_B$  de  $m_{\text{ref}}$  de la carga  $L$  siguiendo la fórmula (4.2.4-4) es despreciable en tanto que la resolución relativa del instrumento es del orden de 10<sup>-6</sup> y, por tanto, mucho mayor que la corrección por empuje del aire. La tabla superior lo demuestra.

### **H1.3/B Errores e incertidumbres asociadas (balance de incertidumbres asociadas)**

Condiciones:

- La incertidumbre en el cero resulta únicamente del escalón  $d_0$  y la repetibilidad  $s$ .
- La carga descentrada se tiene en cuenta para la calibración de acuerdo a (7.1.1-10).
- Se tiene en cuenta el valor de masa convencional de las pesas de ensayo (clase  $E_2$ ) para los resultados de la calibración.  $U(\delta m_c) = U/k$  se calcula de acuerdo a la fórmula 7.1.2-2.
- Se ha monitorizado estadísticamente la deriva de las pesas y el factor  $k_D$  de la fórmula 7.1.2-11 se elige como 1,25.
- Los grados efectivos de libertad para el cálculo del factor de cobertura  $k$  se derivan siguiendo el anexo B3 y la tabla G.2 de [1]. En el caso del ejemplo, la influencia de la incertidumbre del ensayo de repetibilidad con cinco medidas es significativa.
- La información acerca de la incertidumbre relativa  $U(E)_{\text{rel}} = u(E)/m_{\text{ref}}$  no es obligatoria, pero ayuda a demostrar las características de las incertidumbres.

Balance de incertidumbres para la opción 1 (no se aplica corrección por empuje del aire al error de los valores de indicación)

Condición adicional:

La balanza se ajusta inmediatamente antes de la calibración y no se dispone de información acerca de la densidad del aire en el momento de la misma. Por tanto, la fórmula (7.1.2-5c) es relevante.

Magnitud o influencia	Carga, indicación y error en g					Fórmula
	Incertidumbres en g					
Carga $m_{ref}$ /g	0,000 0	50,000 0	99,999 9	149,999 9	220,000 1	
Indicación $I$ / g	0,000 0	50,000 0	99,999 8	149,999 9	220,000 0	
Error de la indicación $E$ /g	0,000 0	0,000 0	-0,000 1	0,000 0	-0,000 1	7.1-1
Repetibilidad $u(\delta I_{rep})$ /g	0,000 114					7.1.1-5
Resolución $u(\delta I_{dig0})$ /g	0,000 029					7.1.1-2a
Resolución $u(\delta I_{digL})$ /g	0,000 0	0,000 029				7.1.1-3a
Excentricidad $u(\delta I_{ecc})$ /g	0,000 0	0,000 029	0,000 058	0,000 087	0,000 127	7.1.1-10
Incertidumbre de la indicación $u(I)$ /g	0,000 118	0,000 124	0,000 134	0,000 149	0,000 175	7.1.1-12
Cargas de ensayo $m_c$ /g	0,000 0	50,000 0	99,999 9	99,999 9 50,000 0	200,000 1 20,000 0	
Masa convencional $u(\delta m_c)$ /g	0,000 0	0,000 015	0,000 025	0,000 040	0,000 063	7.1.2-2
Deriva $u(\delta m_D)$ /g	0,000 0	0,000 022	0,000 036	0,000 058	0,000 090	7.1.2-10
Empuje del aire $u(\delta m_B)$ /g	0,000 000	0,000 014	0,000 022	0,000 036	0,000 055	7.1.2-5c / Tabla E2.1
Convección $u(\delta m_{conv})$ /g	Irrelevante en este caso (pesas aclimatadas)					7.1.2-13
Incertidumbre de las masas de referencia $u(m_{ref})$ /g	0,000 00	0,000 03	0,000 049	0,000 079	0,000 123	7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E)$ /g	0,000 118	0,000 128	0,000 143	0,000 169	0,000 214	7.1.3-1a
$\nu_{eff}$ (grados de libertad)	4	6	9	19	49	B3-1
<b><math>k</math> (95,45 %)</b>	<b>2,87</b>	<b>2,52</b>	<b>2,32</b>	<b>2,14</b>	<b>2,06</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E)</math> /g</b>	<b>0,000 34</b>	<b>0,000 32</b>	<b>0,000 33</b>	<b>0,000 36</b>	<b>0,000 44</b>	7.3-1
$U_{rel}(E)$ /%	----	0,000 64	0,000 33	0,000 24	0,000 20	

Sería aceptable declarar en el certificado, únicamente, el mayor de los valores de la incertidumbre expandida para todos los errores declarados:  $U(E) = 0,000 44$  g, con  $k = 2,06$  acompañada de la declaración de que la probabilidad de cobertura es de al menos el 95 %. El certificado advertirá al usuario de que la incertidumbre expandida declarada en el certificado solamente es aplicable cuando se tiene en cuenta el error ( $E$ ).

Balace de incertidumbres para la opción 2 (corrección por empuje del aire aplicada al error de los valores de la indicación)

Condición adicional:

La balanza se ajusta inmediatamente antes de la calibración. Se aplica el procedimiento de acuerdo a la opción 2, teniendo en cuenta la determinación de la densidad del aire y la corrección por empuje del aire. Por tanto, se aplica la fórmula (7.1.2-5a) para la incertidumbre asociada a la corrección por empuje del aire.

Como se ha realizado un ajuste inmediatamente antes de la calibración, la

máxima variación esperada de los valores de presión, temperatura y humedad que puedan tener lugar en la ubicación del instrumento, no se tienen que tener en cuenta, al contrario que la situación en la que el ajuste se efectúa independientemente de la calibración. El único factor que contribuye a la incertidumbre típica de la densidad del aire proviene de la incertidumbre en la medida de los parámetros ambientales.

Para calcular la incertidumbre relativa de la corrección por empuje del aire se emplean los siguientes valores numéricos, empleando la fórmula (7.1.2-5a):

Densidad del aire $\rho_{\text{aCal}}$ :	1,173 kg/m <sup>3</sup>
Densidad de las masas de referencia $\rho_{\text{Cal}}$ :	(7 950 ± 70) kg/m <sup>3</sup>

Para el cálculo de la incertidumbre relativa de la densidad del aire de acuerdo a (A3-1) se tienen en cuenta las siguientes incertidumbres para la temperatura, la presión y la humedad:

$$u(T) = 0,2 \text{ K}$$
$$u(p) = 50 \text{ Pa}$$
$$u(RH) = 1 \%$$

Esto conduce a  $\frac{u(\rho_a)}{\rho_a} = 9,77 \times 10^{-4}$  y  $u(\rho_a) = 0,001 15 \text{ kg/m}^3$ .

La fórmula (7.1.2-5a) conduce a una incertidumbre relativa para la corrección por empuje del aire de  $u(\delta m_B) = 3,014 \times 10^{-8}$ .

Como alternativa se muestra la incertidumbre adicional por efecto de la convección debida al empleo de pesas no aclimatadas  $u(\delta m_{\text{conv}})$  para una diferencia de temperatura de 2 K.

<b>Magnitud o influencia</b>	<b>Carga, indicación y error en g Incertidumbres en g</b>					<b>Fórmula</b>
<b>Carga <math>m_{ref}</math> /g</b>	0,000 0	50,000 0	99,999 9	149,999 9	220,000 1	
Corrección $\delta m_B$ /g	0,000 0	0,000 001	0,000 002	0,000 003	0,000 005	4.2.4-4
<b>Indicación <math>I</math> /g</b>	0,000 0	50,000 0	99,999 8	149,999 9	220,000 0	
<b>Error de indicación <math>E</math> /g</b>	0,000 0	0,000 0	-0,000 1	0,000 0	-0,000 1	
Empuje del aire $u(\delta m_B)$ /g	0,000 0	0,000 001 5	0,000 003 0	0,000 004 5	0,000 006 6	7.1.2-5a
Convección $u(\delta m_{conv})$ /g	<i>Irrelevante en este caso (pesas aclimatadas).</i>					
Incertidumbre de las masas de referencia $u(m_{ref})$ /g	0,000 000	0,000 026	0,000 044	0,000 066	0,000 110	7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E)$ /g	0,000 118	0,000 127	0,000 141	0,000 163	0,000 207	7.1.3-1a
$\nu_{eff}$ (grados de libertad)	4	6	9	16	43	B3-1
<b><math>k</math> (95,45 %)</b>	<b>2,87</b>	<b>2,52</b>	<b>2,32</b>	<b>2,17</b>	<b>2,06</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E)</math> /g</b>	<b>0,000 34</b>	<b>0,000 32</b>	<b>0,000 33</b>	<b>0,000 35</b>	<b>0,000 43</b>	7.3-1
$U_{rel}(E)$ /%	----	0,000 64	0,000 33	0,000 23	0,000 20	
<i>Como alternativa se muestra la incertidumbre adicional por efecto de la convección debida al empleo de pesas no aclimatadas <math>u(\delta m_{conv})</math> para una diferencia de temperatura de 2 K.</i>						
Convección $u(\delta m_{conv})$ /g	0,000 000	0,000 029	0,000 046	0,000 075	0,000 092	7.1.2-13
Incertidumbre de las masas de referencia $u(m_{ref})$ /g	0,000 000	0,000 031	0,000 051	0,000 079	0,000 122	7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E)$ /g	0,000 118	0,000 128	0,000 144	0,000 168	0,000 214	7.1.3-1a
$\nu_{eff}$ (grados de libertad)	4	6	10	19	49	B3-1
<b><math>k</math> (95,45 %)</b>	<b>2,87</b>	<b>2,52</b>	<b>2,28</b>	<b>2,14</b>	<b>2,06</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E)</math> /g</b>	<b>0,000 34</b>	<b>0,000 32</b>	<b>0,000 33</b>	<b>0,000 36</b>	<b>0,000 44</b>	7.3-1
$U_{rel}(E)$ /%	----	0,000 64	0,000 33	0,000 24	0,000 20	

Las incertidumbres expandidas del error empleando la opción 1 y empleando la opción 2 son prácticamente idénticas ya que la incertidumbre de las masas de referencia  $u(m_{ref})$  es muy pequeña comparada con la incertidumbre de la indicación  $u(I)$ . En este ejemplo, la determinación de la presión y la humedad en la sala para determinar la corrección por empuje del aire y minimizar la contribución a la incertidumbre asociada al empuje del aire no mejora significativamente los resultados de la calibración.

#### H1.4/B Incertidumbre del resultado de una pesada (para la opción 1)

Tal y como se declara en el apartado 7.4, la información descrita a continuación puede ser desarrollada por el laboratorio de calibración o por el usuario del instrumento. Los resultados no deben presentarse como parte del certificado de calibración excepto para el caso del error de indicación aproximado y la

incertidumbre del error aproximado que pueden formar parte del certificado de calibración. Usualmente la información relativa a la incertidumbre del resultado de una pesada se presenta como un anexo del certificado de calibración o en todo caso se muestra de modo claramente separado de los resultados de calibración.

Las condiciones normales de uso del instrumento, asumidas o especificadas por el usuario, pueden incluir:

Ajuste interno del instrumento disponible y activado ( $\Delta T \geq 3$  K).

Variación de la temperatura ambiente  $\Delta T = 5$  K.

Función de tara de la balanza operativa.

Cargas no siempre centradas cuidadosamente.

La incertidumbre del resultado de una pesada se obtiene empleando una aproximación lineal del error de indicación de acuerdo a (C2.2-16).

La incertidumbre del resultado de una pesada se presenta solamente para la opción 1 (no se emplea la corrección por empuje del aire a los valores del error de indicación). El error de indicación aproximado por (C2.2-16) y la incertidumbre del error de indicación aproximado por (C2.2-16d) difieren de manera insignificante entre ambas opciones dado que los factores de ponderación  $p_j = 1/u^2(E_j)$  difieren del orden de unas pocas partes por mil, y los errores de indicación son los mismos para ambas opciones (corrección por empuje del aire inferior a la resolución del instrumento).

Las designaciones  $R$  y  $W$  se introducen para diferenciarlas de la indicación del instrumento de pesaje  $I$  durante la calibración.

$R$ : Lectura obtenida cuando se coloca una carga sobre el instrumento después de su calibración.

$W$ : Resultado de la pesada

Nótese que en la siguiente tabla la lectura  $R$  y todos los resultados están en g.

Magnitud o influencia	Lectura, resultado de la pesada en g Incertidumbres en g o como valores relativos	Fórmula
Error de la indicación $E_{\text{appr}}(R)$ para lecturas brutas o netas: Aproximación por una línea recta que pasa por el cero	$E_{\text{appr}}(R) = -3,895 \times 10^{-7} R$	C2.2-16
<b>Incertidumbre del error aproximado de la indicación</b>		
Incertidumbre típica del error $u(E_{\text{appr}})$	$u^2(E_{\text{appr}}) = 1,517 \times 10^{-13} u^2(R) + 4,015 \times 10^{-13} R^2$ <sup>11</sup>	C2.2-16d
Incertidumbre típica del error, despreciando el término independiente.	$u(E_{\text{appr}}) = 6,337 \times 10^{-7} R$	
<b>Incertidumbres debidas a la influencia de las condiciones ambientales</b>		
Deriva térmica de la sensibilidad	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{temp}}) = 1,299 \times 10^{-6}$	7.4.3-1
Empuje del aire	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{buoy}}) = 1,636 \times 10^{-6}$	7.4.3-4
Cambio en el comportamiento debido a la deriva	Irrelevante en este caso (ajuste interno activado y deriva entre calibraciones despreciable)	7.4.3-5
<b>Incertidumbres debidas al uso del instrumento</b>		
Operación de tara de la balanza	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{Tare}}) = 5,774 \times 10^{-7}$	7.4.4-5
Deriva bajo carga, histéresis (duración de la carga)	Irrelevante en este caso (corto periodo de carga).	7.4.4-9a/b
Carga descentrada	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = 1,154 \times 10^{-6}$	7.4.4-10
<b>Incertidumbre del resultado de una pesada</b>		
Incertidumbre típica, correcciones a aplicar a las lecturas $E_{\text{appr}}$	$u(W) = \sqrt{(1,466 \times 10^{-8} \text{ g}^2 + 6,433 \times 10^{-12} R^2)}$	7.4.5-1a 7.4.5-1b
Incertidumbre expandida, correcciones a aplicar a las lecturas $E_{\text{appr}}$	$U(W) = 2\sqrt{(1,466 \times 10^{-8} \text{ g}^2 + 6,433 \times 10^{-12} R^2)}$	7.5.1-2b
Simplificación al primer orden	$U(W) \approx 2,422 \times 10^{-4} \text{ g} + 4,090 \times 10^{-6} R$	7.5.2-3d
<b>Incertidumbre global del resultado de una pesada sin corrección de las lecturas</b>		
$U_{\text{gl}}(W) = U(W) +  E_{\text{appr}}(R) $	$U_{\text{gl}}(W) \approx 2,422 \times 10^{-4} \text{ g} + 4,479 \times 10^{-6} R$	7.5.2-3a

La condición relativa al valor chi-cuadrado observado siguiendo (C2.2-2a) fue comprobada con resultado positivo. La primera regresión lineal tiene en cuenta los factores de ponderación  $p'_j$ , de acuerdo a la ecuación (C2.2-18b).

Basado en la incertidumbre global, el valor de pesada mínima del instrumento se puede obtener tal y como se indica en el anexo G.

<sup>11</sup>El primer término es despreciable ya que la incertidumbre de la indicación  $u(R)$  está en el orden de algunos mg. Por tanto, el primer término está en el orden de  $10^{-11} \text{ mg}^2$  mientras que el segundo término representa valores hasta  $10^{-7} \text{ mg}^2$ .

Ejemplo:

Requisito de tolerancia de pesada: 1 %

Factor de seguridad: 3

La pesada mínima de acuerdo a la fórmula (G-9), empleando la ecuación mostrada anteriormente para la incertidumbre global es de 0,072 7 g; es decir, el usuario debe pesar una cantidad neta de material que exceda de 0,072 7 g para obtener incertidumbre de medida relativa (global) para un requisito de tolerancia de pesada del 1 % y un factor de seguridad de 3 (equivalente a una tolerancia relativa de pesada de 0,33 %).

## H2 Instrumento de 60 kg de capacidad, multi-escalón

### Nota preliminar:

Se muestra la calibración de una balanza multi-escalón con saltos de escalón de 2 g / 5 g / 10 g. El ejemplo muestra el procedimiento estándar completo para la presentación de los resultados de medida e incertidumbres asociadas, tal y como se lleva a cabo por la mayoría de los laboratorios. Como opción 2 (en cursiva) se presenta un método alternativo para tener en cuenta los efectos del empuje del aire.

### **Primera situación: Ajuste de la sensibilidad realizada independientemente de la calibración.**

#### H2.1/A Condiciones específicas de la calibración

<b>Instrumento</b>	<b>Instrumento de pesaje de funcionamiento no automático, descripción e identificación</b>
<b>Alcances máximos para cada escalón</b> <i>Max<sub>i</sub>/ escalón d<sub>i</sub></i>	<b>12 000 g / 2 g</b> <b>30 000 g / 5 g</b> <b>60 000 g / 10 g</b>
Sensibilidad del instrumento a las variaciones de temperatura	$K_T = 2 \times 10^{-6}/K$ (manual del fabricante); necesario únicamente para el cálculo de la incertidumbre del resultado de una pesada.
Dispositivo de ajuste interno	Actúa automáticamente después de encender la balanza y cuando $\Delta T \geq 3 K$ ; sólo es necesario para el cálculo de la incertidumbre del resultado de una pesada. Estado: activado.
<b>Ajuste por el operador</b>	<b>No ajustado inmediatamente antes de la calibración.</b>
<b>Temperatura durante la calibración</b>	<b>21 °C al principio de la calibración</b> <b>23 °C al final de la calibración.</b>
<i>Presión barométrica y humedad (opcional)</i>	990 hPa, 50 % RH.
Condiciones ambientales	Variación máxima de temperatura durante el uso 10 K (sala del laboratorio sin ventanas). Si se emplea para el cálculo de la incertidumbre por empuje del aire según la fórmula 7.1.2-5e, se debe indicar en el certificado de calibración. Irrelevante para la incertidumbre del resultado de una pesada, cuando el dispositivo de ajuste interno esté activado ( $\Delta T \geq 3 K$ ). En este caso la variación máxima de temperatura para la estimación de la incertidumbre de una pesada es de 3 K.
<b>Cargas de ensayo / Aclimatación</b>	<b>Pesas patrón, clase F<sub>2</sub></b> , aclimatadas a la temperatura de la sala.

## H2.2/A Ensayos y resultados

<b>Repetibilidad</b>	<b>Carga de ensayo 10 000 g</b> aplicada 5 veces (desviación típica supuesta constante en el escalón 1)	<b>Carga de ensayo 25 000 g</b> aplicada 5 veces (desviación típica supuesta constante en los escalones 2 y 3)
Requerimientos indicados en el apartado <b>5.1</b>	9 998 g	24 995 g
Indicación sin carga ajustada a cero cuando sea necesario	10 000 g	25 000 g
Ensayo de repetibilidad efectuado en los escalones 1 y 2	9 998 g	24 995 g
	10 000 g	24 995 g
	10 000 g	25 000 g
<b>Desviación típica</b>	<b><math>s = 1,095 \text{ g}</math></b>	<b><math>s = 2,739 \text{ g}</math></b>

<b>Excentricidad</b>	<b>Posición de la carga</b>	<b>Carga de ensayo 20 000 g</b>
Requerimientos indicados en el apartado <b>5.3</b>	Centro	19 995 g
	Frontal izquierda	19 995 g
Indicación puesta a cero previamente al ensayo; carga puesta en el centro inicialmente, luego se desplaza a las otras posiciones	Trasera izquierda	19 995 g
	Trasera derecha	19 990 g
	Frontal derecha	19 990 g
<b>Máxima desviación</b>	$ \Delta I_{ecc_i} _{\max}$	<b>5 g</b>

### Errores de indicación

Prerrequisitos generales: Requisitos establecidos en el apartado 5.2, pesas distribuidas de manera suficientemente uniforme dentro del rango de medida. Las cargas de ensayo se aplican de una vez; cargas discontinuas solamente crecientes, la indicación sin carga se ajusta a cero si es necesario.

Opción 1: Densidad del aire desconocida durante el ajuste y durante la calibración (es decir no se aplica corrección por empuje del aire a los errores de indicación)

Requisitos indicados en el apartado 5.2, pesas distribuidas de forma suficientemente uniforme.	Carga $m_{ref}$ ( $m_N$ )	Indicación $I$	Error de indicación $E$
	0 g	0 g	0 g
	10 000 g	10 000 g	0 g
	20 000 g	19 995 g	-5 g
Las cargas de ensayo se aplican de una vez; cargas discontinuas solamente crecientes, indicación sin carga ajustada a cero si es necesario.	40 000 g	39 990 g	- 10 g
	60 000 g	59 990 g	- 10 g

Opción 2: Densidad del aire  $\rho_{as}$  durante el ajuste, desconocida y densidad del aire  $\rho_{aCal}$  durante la calibración, calculada de acuerdo a la fórmula simplificada del CIPM (A1.1-1)

Valores medidos empleados para el cálculo:

Presión barométrica  $p$ : 990 hPa

Humedad relativa  $RH$ : 50 %

Temperatura  $t$ : 21 °C

Densidad del aire  $\rho_{aCal}$ : 1,173 kg/m<sup>3</sup>

Corrección por empuje del aire  $\delta m_B$ , calculada de acuerdo a la fórmula 4.2.4-4:

Valores numéricos usados para el cálculo:

Densidad de la masa de referencia  $\rho_{Cal}$ : (7 950 ± 70) kg/m<sup>3</sup>

Corrección por empuje del aire  $\delta m_B$ :  $2,138 \times 10^{-8} m_N$

La corrección por empuje del aire  $\delta m_B$ , de las cargas  $m_N$  calculada siguiendo la fórmula (4.2.4-4) es despreciable, en tanto que la resolución relativa del instrumento es del orden de  $10^{-4}$  y, por tanto, mucho mayor que la corrección por empuje del aire. La tabla superior lo demuestra.

### H2.3/A Errores e incertidumbres asociadas (balance de incertidumbres asociadas)

Condiciones comunes para ambas opciones:

- La incertidumbre del error en el cero solamente incluye la incertidumbre de la indicación sin carga (resolución en el escalón  $d_0 = d_1 = 2$  g) y la repetibilidad  $s$ .
- La incertidumbre de la indicación con carga no se tiene en cuenta en el cero.
- El ensayo de excentricidad se tiene en cuenta para la calibración de acuerdo a (7.1.1-10).
- El error de la indicación se determina empleando el valor nominal de las pesas como valor de referencia, por tanto se tiene en cuenta el error máximo permitido

de las pesas de ensayo para obtener la contribución a la incertidumbre debida a las masas de referencia:  $u(\delta m_c)$  se calcula como  $u(\delta m_c) = Tol/\sqrt{3}$  siguiendo la fórmula (7.1.2-3).

- La deriva promedio de las pesas monitorizada a través de dos recalibraciones en intervalos de dos años fue  $|D| \leq emp/2$ . Por tanto, la contribución a la incertidumbre debida a la deriva de las pesas se puede establecer como  $u(\delta m_D) = emp/2\sqrt{3}$ . Esto se corresponde con un factor  $k_D$  de 1,5 (asumiendo la peor situación de  $U = emp/3$ ).
- Las pesas se encuentra aclimatadas con una diferencia de temperatura residual de 2 K con relación a la temperatura ambiente.
- Los grados de libertad para el cálculo del factor de cobertura  $k$  se obtienen siguiendo el anexo B3 y la tabla G.2 de [1]. En el caso del ejemplo, la influencia de la incertidumbre del ensayo de repetibilidad con 5 medidas es significativa.
- La información acerca de la incertidumbre relativa  $U(E)_{rel} = u(E)/m_{ref}$  no es obligatoria, pero ayuda a demostrar las características de las incertidumbres.

Balance de incertidumbres para la opción 1 (no se aplica corrección por empuje del aire a los valores del error de indicación)

Condición adicional:

La balanza no se ajusta inmediatamente antes de la calibración. Se aplica el procedimiento de acuerdo a la opción 1, sin información acerca de la densidad del aire. Por tanto, se aplica la fórmula (7.1.2-5d) para la determinación de la incertidumbre por empuje del aire. Como alternativa, en la tabla, se emplea la fórmula (7.1.2-5e), asumiendo de ese modo una variación de la temperatura durante el uso de 10 K.

Magnitud o influencia	Carga, indicación y error en g					Fórmula
	Incertidumbres en g					
Carga $m_{ref} (m_N) / g$	0	10 000	20 000	40 000	60 000	
Indicación $I / g$	0	10 000	19 995	39 990	59 990	
Error de la indicación $E / g$	0	0	- 5	- 10	- 10	7.1-1
Repetibilidad $u(\delta I_{rep}) / g$	1,095		2,739			7.1.1-5
Resolución $u(\delta I_{dig0}) / g$	0,577					7.1.1-2a
Resolución $u(\delta I_{digL}) / g$	0,000	0,577	1,443	2,887	2,887	7.1.1-3a
Excentricidad $u(\delta I_{ecc}) / g$	0,000	0,722	1,443	2,887	4,330	7.1.1-10
Incertidumbre de la indicación $u(I) / g$	1,238	1,545	3,464	4,950	5,909	7.1.1-12
Cargas de ensayo $m_N / g$	0	10 000	20 000	20 000 20 000	20 000 20 000 20 000	
Pesas $u(\delta m_c) / g$	0,000	0,092	0,173	0,346	0,554	7.1.2-3
Deriva $u(\delta m_D) / g$	0,000	0,046	0,087	0,173	0,277	7.1.2-11
Empuje del aire $u(\delta m_B) / g$	0,000	0,110	0,217	0,433	0,658	7.1.2-5d / Tabla E2.1
Convección $u(\delta m_{conv}) / g$	Irrelevante en este caso (relevante únicamente para $F_1$ y mejores).					7.1.2-13
Incertidumbre de las masas de referencia $u(m_{ref}) / g$	0,000	0,151	0,290	0,581	0,904	7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E) / g$	1,238	1,552	3,476	4,984	5,978	7.1.3-1a
$\nu_{eff}$ (grados de libertad)	6	16	10	43	90	B3-1
<b><math>k</math> (95,45 %)</b>	<b>2,52</b>	<b>2,17</b>	<b>2,28</b>	<b>2,06</b>	<b>2,05</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E) / g</math></b>	<b>3,120</b>	<b>3,369</b>	<b>7,926</b>	<b>10,266</b>	<b>12,254</b>	7.3-1
$U_{rel}(E) / \%$	----	0,0337 %	0,0396 %	0,0257 %	0,0204 %	
<i>Alternativa: Incertidumbre debida al empuje del aire calculada según la fórmula (7.1.2-5e) en vez de según (7.1.2-5d), es decir sustituyendo la aproximación en el peor de los casos, por un valor derivado de la estimación de la variación de la temperatura de la sala durante el uso de 10 K.</i>						
Empuje del aire $u(\delta m_B) / g$	0,000	0,046	0,089	0,178	0,276	7.1.2-5e
Incertidumbre de las masas de referencia $u(\delta m_{ref}) / g$	0,000	0,113	0,213	0,462	0,678	7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E) / g$	1,238	1,549	3,471	4,968	5,948	7.1.3-1a
$\nu_{eff}$ (grados de libertad)	6	16	10	43	88	B3-1
<b><math>k</math> (95,45 %)</b>	<b>2,52</b>	<b>2,17</b>	<b>2,28</b>	<b>2,06</b>	<b>2,05</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E) / g</math></b>	<b>3,120</b>	<b>3,362</b>	<b>7,913</b>	<b>10,234</b>	<b>12,193</b>	7.3-1
$U_{rel}(E) / \%$	----	0,033 6	0,039 6	0,025 6	0,020 3	

En este ejemplo se observa que la incertidumbre de las masas patrón se reduce de manera significativa, si la contribución a la incertidumbre por empuje del aire tenida en cuenta, se calcula a partir de los cambios de temperatura de la sala estimados durante el uso, en vez de usando la aproximación más conservadora dada por (7.1.2-5d).

*Sin embargo, como la incertidumbre de las masas de referencia es muy pequeña comparada con la incertidumbre de la indicación, la incertidumbre típica del error apenas se ve afectada.*

Sería aceptable declarar en el certificado, solamente, el valor máximo de la incertidumbre expandida para todos los errores dados:  $U(E) = 12,254 \text{ g}$ , basada en  $k = 2,05$ , acompañada de la declaración de que la probabilidad de cobertura es de al menos el 95 %.

El certificado advertirá al usuario de que la incertidumbre expandida declarada en el certificado sólo es aplicable cuando se tiene en cuenta el error ( $E$ ).

*Balance de incertidumbres para la opción 2 (corrección por empuje del aire aplicada a los valores del error de indicación)*

*Condición adicional:*

*La balanza no se ajusta inmediatamente antes de la calibración. El procedimiento se aplica, de acuerdo a la opción 2, teniendo en cuenta la determinación de la densidad del aire y la corrección por empuje del aire. Por tanto, se aplica la fórmula (7.1.2-5a) para la determinación de la incertidumbre debida al empuje del aire.*

*Nótese que la densidad del aire durante el ajuste (que tuvo lugar independientemente de la calibración) es desconocida, por lo tanto la variación de la densidad del aire en el tiempo se toma como una estimación para la incertidumbre. Consecuentemente, la incertidumbre de la densidad del aire se obtiene basándose en estimaciones de las variaciones de la presión, la temperatura y la humedad que pueden ocurrir en el emplazamiento del instrumento.*

*El anexo A3 proporciona indicaciones para estimar la incertidumbre de la densidad del aire. El ejemplo utiliza una aproximación de la incertidumbre basada en (A3-2) en vez de la ecuación general (A3-1), es decir, con la temperatura como único parámetro variable.*

*Para una variación de temperatura de 10 K, el cálculo empleando la aproximación dada por la fórmula (A3-2) conduce a una incertidumbre relativa de  $u(\rho_a)/\rho_a = 1,55 \times 10^{-2}$ , que, para una densidad del aire en calibración de  $\rho_a = 1,173 \text{ kg/m}^3$ , implica una incertidumbre  $u(\rho_a) = 0,018 \text{ kg/m}^3$ .*

*Para calcular la incertidumbre relativa de la corrección por empuje del aire se tienen en cuenta los siguientes valores numéricos, empleando la fórmula (7.1.2-5a):*

*Densidad del aire  $\rho_{aCal}$ :  $(1,173 \pm 0,018) \text{ kg/m}^3$*

*Densidad de la masa de referencia  $\rho_{Cal}$ :  $(7\,950 \pm 70) \text{ kg/m}^3$*

*La fórmula (7.1.2-5a) conduce a una incertidumbre relativa de la corrección por empuje del aire de  $u_{rel}(\delta m_B) = 3,334 \times 10^{-8}$ .*

*La incertidumbre relativa de la corrección por empuje del aire es despreciable comparada con las otras contribuciones a la incertidumbre de la masa de referencia.*

*Este ejemplo muestra que la corrección calculada del error  $\delta m_B$  y la*

*incertidumbre relativa de la corrección por empuje del aire calculada  $u_{\text{rel}}(\delta m_{\text{B}})$  son ambas despreciables. Esto conduce a una actualización del balance de incertidumbres:*

Magnitud o influencia	Carga, indicación y error en g					Fórmula
	Incertidumbres en g					
Carga $m_{\text{ref}} (m_N) / \text{g}$	0	10 000	20 000	40 000	60 000	
Corrección $\delta m_B / \text{g}$	0	0	0	0	0	4.2.4-4
Indicación $I / \text{g}$	0	10 000	19 995	39 990	59 990	
Error de la indicación $E / \text{g}$	0	0	- 5	- 10	- 10	7.1-1
Repetibilidad $u(\delta I_{\text{rep}}) / \text{g}$	1,095		2,739			7.1.1-5
Resolución $u(\delta I_{\text{dig0}}) / \text{g}$	0,577					7.1.1-2a
Resolución $u(\delta I_{\text{digL}}) / \text{g}$	0,000	0,577	1,443	2,887	2,887	7.1.1-3a
Excentricidad $u(\delta I_{\text{ecc}}) / \text{g}$	0,000	0,722	1,443	2,887	4,330	7.1.1-10
Incertidumbre de la indicación $u(I) / \text{g}$	1,238	1,545	3,464	4,950	5,909	7.1.1-12
Cargas de ensayo $m_N / \text{g}$	0	10 000	20 000	20 000 20 000	20 000 20 000 20 000	
Pesas $u(\delta m_c) / \text{g}$	0,000	0,092	0,173	0,346	0,554	7.1.2-3
Deriva $u(\delta m_D) / \text{g}$	0,000	0,046	0,087	0,173	0,277	7.1.2-11
Empuje del aire $u(\delta m_B) / \text{g}$	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	7.1.2-5a
Convección $u(\delta m_{\text{conv}}) / \text{g}$	Irrelevante en este caso (relevante únicamente para $F_1$ y mejores).					7.1.2-13
Incertidumbre de la masa de referencia $u(m_{\text{ref}}) / \text{g}$	0,000	0,103	0,194	0,387	0,620	7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E) / \text{g}$	1,238	1,549	3,470	4,965	5,941	7.1.3-1a
$\nu_{\text{eff}}$ (grados de libertad)	6	15	10	43	88	B3-1
<b><math>k</math> (95,45 %)</b>	<b>2,52</b>	<b>2,17</b>	<b>2,28</b>	<b>2,06</b>	<b>2,05</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E) / \text{g}</math></b>	<b>3,120</b>	<b>3,360</b>	<b>7,910</b>	<b>10,228</b>	<b>12,180</b>	7.3-1
$U_{\text{rel}}(E) / \%$	----	0.0360	0,0396	0,0256	0,0203	

En este ejemplo se observa que la contribución por empuje del aire a la incertidumbre típica es insignificante. Más aún, las incertidumbres típicas del error empleando la opción 1 y la opción 2 son prácticamente iguales dado que la incertidumbre de la masa de referencia  $u(m_{\text{ref}})$  es muy pequeña en comparación con la incertidumbre de la indicación  $u(I)$ . La determinación de la presión y la humedad en el local, junto con la medida de la temperatura para efectuar la corrección por empuje del aire y minimizar la contribución a la incertidumbre asociada, no mejora significativamente los resultados de la calibración.

#### H2.4/A Incertidumbre del resultado de una pesada (para la opción 1)

Tal y como se declara en el apartado 7.4, la información descrita a continuación se puede desarrollar por el laboratorio de calibración o por el usuario del instrumento. Los resultados no deben presentarse como parte del certificado de calibración excepto para el caso del error de indicación aproximado y la incertidumbre del error aproximado que pueden formar parte del certificado de calibración. Usualmente, la información relativa a la incertidumbre del resultado de una pesada se presenta como un anexo del certificado de calibración o, en todo caso, se muestra de modo claramente separado de los resultados de calibración.

Las condiciones normales de uso del instrumento, asumidas o especificadas por el usuario, pueden incluir:

Ajuste interno del instrumento disponible y activado ( $\Delta T \geq 3$  K).

Variación de la temperatura ambiente  $\Delta T = 10$  K.

Función de tara de la balanza operativa.

Cargas no siempre centradas cuidadosamente.

La incertidumbre del resultado de una pesada se obtiene empleando una aproximación lineal del error de indicación, de acuerdo a (C2.2-16).

La incertidumbre del resultado de una pesada se presenta solamente para la opción 1 (no se emplea la corrección por empuje del aire a los valores del error de indicación). El error de indicación aproximado por (C2.2-16) y la incertidumbre del error de indicación aproximado por (C2.2-16d), difieren de manera insignificante entre ambas opciones, dado que los factores de ponderación  $p_j = 1/u^2(E_j)$ , difieren del orden de unas pocas partes por mil, y los errores de indicación son los mismos para ambas opciones (corrección por empuje del aire inferior a la resolución del instrumento).

El empuje del aire, de acuerdo al apartado 7.4.3.2, no se tiene en cuenta dado que la estimación de la incertidumbre en calibración ha demostrado que su influencia es despreciable.

Las designaciones  $R$  y  $W$ , se introducen para diferenciarlas de la indicación del instrumento de pesaje  $I$ , durante la calibración.

$R$ : Lectura obtenida cuando se coloca una carga sobre el instrumento después de su calibración.

$W$ : Resultado de la pesada

Nótese que en la siguiente tabla, la lectura  $R$  y todos los resultados, están en g.

Magnitud o influencia	Lectura, resultado de la pesada y error en g Incertidumbres en g o como valores relativos		Fórmula
Error de la indicación $E_{\text{appr}}(R)$ para lecturas brutas o netas: Aproximación por una línea recta que pasa por el cero	$E_{\text{appr}}(R) = -1,717 \times 10^{-4} R$		C2.2-16
<b>Incertidumbre del error de indicación aproximado</b>			
Incertidumbre típica del error $u(E_{\text{appr}})$	$u^2(E_{\text{appr}}) = 2,950 \times 10^{-8} u^2(R) + 4,172 \times 10^{-9} R^2$ <sup>12</sup>		C2.2-16d
Incertidumbre típica del error, despreciando el término independiente	$u(E_{\text{appr}}) = 6,459 \times 10^{-5} R$		
<b>Incertidumbres debidas a la influencia de las condiciones ambientales</b>			
Deriva térmica de la sensibilidad	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{temp}}) = 1,732 \times 10^{-6}$		7.4.3-1
Empuje del aire	Irrelevante en este caso.		7.4.3-2
Cambio en el comportamiento debido a la deriva	Irrelevante en este caso (ajuste interno activado y deriva entre calibraciones despreciable).		7.4.3-5
<b>Incertidumbres debidas al uso del instrumento</b>			
Operación de tara de la balanza	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{Tare}}) = 1,444 \times 10^{-4}$		7.4.4-5
Deriva bajo carga, histéresis (duración de la carga)	Irrelevante en este caso (corta duración de la carga).		7.4.4-9a/b
Carga descentrada	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = 1,443 \times 10^{-4}$		7.4.4-10
<b>Incertidumbre del resultado de una pesada, para intervalos de carga parciales (ICP)</b>			
Incertidumbre típica, correcciones a aplicar a las lecturas $E_{\text{appr}}$	ICP 1	$u(W) = \sqrt{(1,867 \text{ g}^2 + 4,589 \times 10^{-8} R^2)}$	7.4.5-1b
	ICP 2	$u(W) = \sqrt{(9,917 \text{ g}^2 + 4,589 \times 10^{-8} R^2)}$	
	ICP 3	$u(W) = \sqrt{(16,167 \text{ g}^2 + 4,589 \times 10^{-8} R^2)}$	
Incertidumbre expandida, correcciones a aplicar a las lecturas $E_{\text{appr}}$	ICP 1	$U(W) = 2\sqrt{(1,867 \text{ g}^2 + 4,589 \times 10^{-8} R^2)}$	7.5.1-2b
	ICP 2	$U(W) = 2\sqrt{(9,917 \text{ g}^2 + 4,589 \times 10^{-8} R^2)}$	
	ICP 3	$U(W) = 2\sqrt{(16,167 \text{ g}^2 + 4,589 \times 10^{-8} R^2)}$	
Simplificación al primer orden	ICP 1	$U(W) \approx 2,733 \text{ g} + 2,574 \times 10^{-4} R$	7.5.2-3f
	ICP 2	$U(W) \approx 10,190 \text{ g} + 3,434 \times 10^{-4} (R - 12\,000 \text{ g})$	
	ICP 3	$U(W) \approx 20,311 \text{ g} + 3,923 \times 10^{-4} (R - 30\,000 \text{ g})$	
<b>Incertidumbre global del resultado de una pesada sin corrección de las indicaciones</b>			
$U_{\text{gl}}(W) = U(W) +  E_{\text{appr}}(R) $	ICP 1	$U_{\text{gl}}(W) \approx 2,733 \text{ g} + 4,291 \times 10^{-4} R$	7.5.2-3a
	ICP 2	$U_{\text{gl}}(W) \approx 10,190 \text{ g} + 5,151 \times 10^{-4} (R - 12\,000 \text{ g})$	
	ICP 3	$U_{\text{gl}}(W) \approx 20,311 \text{ g} + 5,641 \times 10^{-4} (R - 30\,000 \text{ g})$	

<sup>12</sup>El primer término es despreciable, ya que la incertidumbre de la indicación  $u(R)$  está en el orden de algunos g. Por tanto, el primer término está en el orden de  $10^{-7} \text{ g}^2$ , mientras que el segundo término representa valores hasta  $15 \text{ g}^2$ .

La condición relativa al valor chi-cuadrado observado siguiendo (C2.2-2a) fue comprobada con resultado positivo. La primera regresión lineal tiene en cuenta los factores de ponderación  $p'_j$ , de acuerdo a la ecuación (C2.2-18b).

Basado en la incertidumbre global, el valor de pesada mínima del instrumento se puede obtener tal y como se indica en el anexo G.

Ejemplo:

Requisito de tolerancia de pesada: 1 %

Factor de seguridad: 2

La pesada mínima de acuerdo a la fórmula (G-9), empleando la ecuación mostrada anteriormente para la incertidumbre global en el ICP 1 es de 598 g; es decir, el usuario debe pesar una cantidad neta de material que exceda de 598 g para obtener una incertidumbre de medida relativa (global) para un requisito de tolerancia de pesada del 1 % y un factor de seguridad de 2 (equivalente a una tolerancia relativa de pesada de 0,5 %).

**Segunda situación: Ajuste de la sensibilidad efectuado inmediatamente antes de la calibración**

**H2.1/B Condiciones específicas de la calibración**

<b>Instrumento</b>	<b>Instrumento de pesaje de funcionamiento no automático, descripción e identificación</b>
<b>Alcance máximo para cada escalón <math>Max_i</math>/ escalón <math>d_i</math></b>	<b>12 000 g / 2 g 30 000 g / 5 g 60 000 g / 10 g</b>
Sensibilidad del instrumento a las variaciones de temperatura	$K_T = 2 \times 10^{-6}/K$ (manual del fabricante); necesario únicamente para el cálculo de la incertidumbre del resultado de una pesada.
Dispositivo de ajuste interno	Actúa automáticamente después de encender la balanza y cuando $\Delta T \geq 3 K$ ; sólo es necesario para el cálculo de la incertidumbre del resultado de una pesada. Estado: activado.
<b>Ajuste por el operador</b>	<b>Ajustado inmediatamente antes de la calibración (ajuste con pesas internas).</b>
<b>Temperatura durante la calibración</b>	<b>23 °C al principio de la calibración 24 °C al final de la calibración</b>
<i>Presión barométrica y humedad (opcional)</i>	990 hPa, 50 % RH.
Condiciones ambientales	Variación máxima de temperatura durante el uso 10 K (sala del laboratorio sin ventanas). Irrelevante cuando el dispositivo de ajuste interno esté activado ( $\Delta T \geq 3 K$ ). En este caso la variación máxima de temperatura para la estimación de la incertidumbre de una pesada es de 3 K.
<b>Cargas de ensayo / Aclimatación</b>	<b>Pesas patrón, clase F<sub>2</sub></b> , aclimatadas a la temperatura de la sala.

## H2.2/B Ensayos y resultados

<b>Repetibilidad</b>	<b>Carga de ensayo 10 000 g</b> aplicada 5 veces (desviación típica supuesta constante en el escalón 1)	<b>Carga de ensayo 25 000 g</b> aplicada 5 veces (desviación típica supuesta constante en los escalones 2 y 3)
Requisitos indicados en el apartado <b>5.1</b>		
Indicación sin carga ajustada a cero cuando sea necesario	10 000 g	25 000 g
	10 000 g	25 000 g
	9 998 g	25 000g
Ensayo de repetibilidad efectuado en los escalones 1 y 2	10 000 g	24 995g
	10 000 g	25 000 g
<b>Desviación típica</b>	<b><math>s = 0,894 \text{ g}</math></b>	<b><math>s = 2,236 \text{ g}</math></b>

<b>Excentricidad</b>	<b>Posición de la carga</b>	<b>Carga de ensayo 20 000 g</b>
Requisitos indicados en el apartado <b>5.3</b>	Centro	20 000 g
	Frontal izquierda	20 000 g
Indicación puesta a cero previamente al ensayo; carga puesta en el centro inicialmente, luego se desplaza a las otras posiciones	Trasera izquierda	20 000 g
	Trasera derecha	20 000 g
	Frontal derecha	19 995 g
<b>Máxima desviación</b>	$ \Delta I_{ecc_i} _{\max}$	<b>5 g</b>

### Errores de indicación

Prerrequisitos generales: Requisitos establecidos en el apartado 5.2, pesas distribuidas de manera suficientemente uniforme dentro del rango de medida.

Las cargas de ensayo se aplican de una vez; cargas discontinuas solamente crecientes, la indicación sin carga se ajusta a cero si es necesario.

Opción 1: Densidad del aire desconocida durante el ajuste y durante la calibración (es decir, no se aplica corrección por empuje del aire a los errores de indicación)

	<b>Carga <math>m_{\text{ref}}</math> (<math>m_N</math>)</b>	<b>Indicación <math>I</math></b>	<b>Error de indicación <math>E</math></b>
Requisitos indicados en el apartado <b>5.2</b> , pesas distribuidas de forma suficientemente uniforme.	0 g	0 g	0 g
	10 000 g	10 000 g	0 g
	20 000 g	20 000 g	0 g
Las cargas de ensayo se aplican de una vez; cargas discontinuas solamente crecientes, indicación sin carga ajustada a cero si es necesario.	40 000 g	40 000 g	0 g
	60 000 g	60 000 g	0 g

Opción 2: Densidad del aire  $\rho_{as}$  durante el ajuste, desconocida y densidad del aire  $\rho_{aCal}$  durante la calibración son idénticas ya que el ajuste fue realizado inmediatamente antes de la calibración

La densidad del aire se calcula de acuerdo a la fórmula simplificada del CIPM (A1.1-1):

Valores medidos empleados para el cálculo:

Presión barométrica $p$ :	990 hPa
Humedad relativa RH:	50 %
Temperatura $t$ :	23 °C
Densidad del aire $\rho_{aCal}$ :	1,165 kg/m <sup>3</sup>

Corrección por empuje del aire  $\delta m_B$  calculada de acuerdo a la fórmula (4.2.4-4):

Valor numérico empleado para el cálculo

Densidad de la masa de referencia  $\rho_{Cal}$ : (7 950 ± 70) kg/m<sup>3</sup>

Corrección por empuje del aire  $\delta m_B$ :  $2,762 \times 10^{-8} m_N$

La corrección calculada  $\delta m_B$  de las cargas de ensayo  $m_N$  de acuerdo a la fórmula (4.2.4-4) es despreciable, dado que la resolución relativa del instrumento es del orden de  $10^{-4}$  y, por tanto, mucho mayor que la corrección por empuje del aire. La tabla superior lo demuestra.

## H2.3/B Errores e incertidumbres asociadas (balance de incertidumbres asociadas)

Condiciones comunes para ambas opciones:

- La incertidumbre del error en el cero, solamente incluye la incertidumbre de la indicación sin carga (resolución en el escalón  $d_0 = d_1 = 2$  g) y la repetibilidad  $s$ . La incertidumbre de la indicación con carga no se tiene en cuenta en el cero.
- El ensayo de excentricidad se tiene en cuenta para la calibración de acuerdo a (7.1.1-10).
- El error de la indicación se determina empleando el valor nominal de las pesas como valor de referencia, por tanto, se tiene en cuenta el error máximo permitido de las pesas de ensayo para obtener la contribución a la incertidumbre debida a las masas de referencia:  $u(\delta m_c)$  se calcula como  $u(\delta m_c) = Tol/\sqrt{3}$  siguiendo la fórmula (7.1.2-3).
- La deriva promedio de las pesas, monitorizada a través de 2 recalibraciones, en intervalos de dos años, fue  $|D| \leq emp/2$ . Por tanto, la contribución a la incertidumbre debida a la deriva de las pesas se puede establecer como  $u(\delta m_D) = emp/2\sqrt{3}$ . Esto se corresponde con un factor  $k_D$  de 1,5 (asumiendo la peor situación de  $U = emp/3$ ).
- Las pesas se encuentra aclimatadas, con una diferencia de temperatura residual de 2 K con relación a la temperatura ambiente.
- Los grados de libertad para el cálculo del factor de cobertura  $k$ , se obtienen siguiendo el anexo B3 y la tabla G.2 de [1]. En el caso del ejemplo, la influencia de la incertidumbre del ensayo de repetibilidad con 5 medidas es significativa.

- La información acerca de la incertidumbre relativa  $U(E)_{\text{rel}} = u(E)/m_{\text{ref}}$  no es obligatoria, pero ayuda a demostrar las características de las incertidumbres.

Balance de incertidumbres para la opción 1 (no se aplica corrección por empuje del aire a los valores del error de indicación)

Condición adicional:

La balanza se ajusta inmediatamente antes de la calibración. Se aplica el procedimiento de acuerdo a la opción 1, sin información acerca de la densidad del aire. Por tanto, se aplica la fórmula (7.1.2-5c) para la determinación de la incertidumbre por empuje del aire.

Magnitud o influencia	Carga, indicación y error en g					Fórmula
	Incertidumbres en g					
Carga $m_{\text{ref}} (m_N) / \text{g}$	0	10 000	20 000	40 000	60 000	
Indicación $I / \text{g}$	0	10 000	20 000	40 000	60 000	
Error de la indicación $E / \text{g}$	0	0	0	0	0	7.1-1
Repetibilidad $u(\delta I_{\text{rep}}) / \text{g}$	0,894		2,236			7.1.1-5
Resolución $u(\delta I_{\text{dig0}}) / \text{g}$	0,577					7.1.1-2a
Resolución $u(\delta I_{\text{digL}}) / \text{g}$	0,000	0,577	1,443	2,887	2,887	7.1.1-3a
Excentricidad $u(\delta I_{\text{ecc}}) / \text{g}$	0,000	0,722	1,443	2,887	4,330	7.1.1-10
Incertidumbre de la indicación $u(I) / \text{g}$	1,065	1,410	3,082	4,690	5,694	7.1.1-12
Cargas de ensayo $m_N / \text{g}$	0	10 000	20 000	20 000 20 000	20 000 20 000 20 000	
Pesas $u(\delta m_c) / \text{g}$	0,000	0,092	0,173	0,346	0,554	7.1.2-3
Deriva $u(\delta m_D) / \text{g}$	0,000	0,046	0,087	0,173	0,277	7.1.2-11
Empuje del aire $u(\delta m_B) / \text{g}$	0,000	0,023	0,043	0,087	0,139	7.1.2-5c
Convección $u(\delta m_{\text{conv}}) / \text{g}$	Irrelevante en este caso (relevante únicamente para $F_1$ y mejores).					7.1.2-13
Incertidumbre de las masas de referencia $u(m_{\text{ref}}) / \text{g}$	0,000	0,106	0,198	0,397	0,635	7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E) / \text{g}$	1,065	1,414	3,089	4,707	5,739	7.1.3-1a
$\nu_{\text{eff}}$ (grados de libertad)	8	25	14	78	172	B3-1
<b><math>k</math> (95,45 %)</b>	<b>2,37</b>	<b>2,11</b>	<b>2,20</b>	<b>2,05</b>	<b>2,025</b>	[1],
<b><math>U(E) = ku(E) / \text{g}</math></b>	<b>2,523</b>	<b>2,983</b>	<b>6,795</b>	<b>9,650</b>	<b>11,601</b>	7.3-1
$U_{\text{rel}}(E) / \%$	----	0,029 8	0,034 0	0,024 1	0,019 3	

Sería aceptable declarar en el certificado, solamente, el valor máximo de la incertidumbre expandida para todos los errores dados:  $U(E) = 11,601 \text{ g}$ , para  $k = 2,025$ , acompañada de la declaración de que la probabilidad de cobertura es de al menos el 95 %.

El certificado advertirá al usuario de que la incertidumbre expandida declarada en el certificado sólo es aplicable cuando se tiene en cuenta el error ( $E$ ).

Balance de incertidumbres para la opción 2 (corrección por empuje del aire aplicada a los valores del error de indicación)

Condición adicional:

La balanza se ajusta inmediatamente antes de la calibración. El procedimiento se aplica, de acuerdo a la opción 2, teniendo en cuenta la determinación de la densidad del aire y la corrección por empuje del aire. Por tanto, se aplica la fórmula (7.1.2-5a) para la determinación de la incertidumbre debida al empuje del aire.

Como se ha realizado un ajuste inmediatamente antes de la calibración, la máxima variación esperada de los valores de presión, temperatura y humedad, que puedan tener lugar en la ubicación del instrumento, no se tienen que tener en cuenta, al contrario que la situación en la que el ajuste se efectúa independientemente de la calibración. El único factor que contribuye a la incertidumbre típica de la densidad del aire, proviene de la incertidumbre de la medida de los parámetros ambientales.

Para calcular la incertidumbre relativa de la corrección por empuje del aire, empleando la fórmula (7.1.2-5a), se emplean los siguientes valores numéricos:

Densidad del aire  $\rho_{aCal}$ : 1,165 kg/m<sup>3</sup>

Densidad de la masa de referencia  $\rho_{Cal}$ : (7 950 ± 70) kg/m<sup>3</sup>

Para el cálculo de la incertidumbre relativa de la densidad del aire de acuerdo a (A3-1) se tienen en cuenta las siguientes incertidumbres para la temperatura, la presión y la humedad:

$$u(T) = 0,2 \text{ K}$$

$$u(p) = 50 \text{ Pa}$$

$$u(RH) = 1 \%$$

Esto conduce a  $\frac{u(\rho_a)}{\rho_a} = 9,77 \times 10^{-4}$  y  $u(\rho_a) = 0,00114 \text{ kg/m}^3$ .

La fórmula (7.1.2-5a) conduce a una incertidumbre relativa de la corrección por empuje del aire de  $u_{rel}(\delta m_B) = 3,892 \times 10^{-8}$ .

La incertidumbre relativa de la corrección por empuje del aire es despreciable comparada a las otras contribuciones a la incertidumbre de la masa de referencia.

Este ejemplo muestra que la corrección del error  $\delta m_B$  y la incertidumbre relativa de la corrección por empuje del aire  $u_{rel}(\delta m_B)$  calculadas son ambas despreciables. Esto conlleva a la actualización del balance de incertidumbres de medida:

Magnitud o influencia	Carga, indicación y error en g					Fórmula
	Incertidumbres en g					
Carga $m_{\text{ref}} (m_N) / g$	0	10 000	20 000	40 000	60 000	
Corrección $\delta m_B / g$	0	0	0	0	0	4.2.4-4
Indicación $I / g$	0	10 000	20 000	40 000	60 000	
Error de la indicación $E / g$	0	0	0	0	0	7.1-1
Repetibilidad $u(\delta I_{\text{rep}}) / g$	0,894		2,236			7.1.1-5
Resolución $u(\delta I_{\text{dig0}}) / g$	0,577					7.1.1-2a
Resolución $u(\delta I_{\text{digL}}) / g$	0,000	0,577	1,443	2,887	2,887	7.1.1-3a
Excentricidad $u(\delta I_{\text{ecc}}) / g$	0,000	0,722	1,443	2,887	4,330	7.1.1-10
Incertidumbre de la indicación $u(I) / g$	1,065	1,410	3,082	4,690	5,694	7.1.1-12
Cargas de ensayo $m_N / g$	0	10 000	20 000	20 000 20 000 20 000	20 000 20 000 20 000	
Pesas $u(\delta m_c) / g$	0,000	0,092	0,173	0,346	0,554	7.1.2-3
Deriva $u(\delta m_D) / g$	0,000	0,046	0,087	0,173	0,277	7.1.2-11
Empuje del aire $u(\delta m_B) / g$	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	7.1.2-5c
Convección $u(\delta m_{\text{conv}}) / g$	Irrelevante en este caso (sólo relevante para $F_1$ y mejores).					7.1.2-13
Incertidumbre de la masa de referencia $u(m_{\text{ref}}) / g$	0,000	0,103	0,194	0,387	0,620	7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E) / g$	1,065	1,414	3,089	4,706	5,727	7.1.3-1a
$\nu_{\text{eff}}$ (grados de libertad)	8	25	14	78	172	B3-1
<b>k (95,45 %)</b>	<b>2,37</b>	<b>2,11</b>	<b>2,20</b>	<b>2,05</b>	<b>2,025</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E) / g</math></b>	<b>2,523</b>	<b>2,983</b>	<b>6,794</b>	<b>9,648</b>	<b>11,598</b>	7.3-1
$U_{\text{rel}}(E) / \%$	----	0,030 1	0,034 0	0,024 1	0,019 3	

Las incertidumbres expandidas del error, empleando el procedimiento estándar y empleando la opción, son prácticamente idénticas, ya que la incertidumbre de las masas de referencia  $u(m_{\text{ref}})$  es muy pequeña, comparada con la incertidumbre de la indicación  $u(I)$ . En este ejemplo, la determinación de la presión y la humedad en la sala, para determinar la corrección por empuje del aire y minimizar la contribución a la incertidumbre asociada al empuje del aire, no mejora significativamente los resultados de la calibración.

## H2.4/B Incertidumbre del resultado de una pesada (para la opción 1)

Tal y como se declara en el apartado 7.4, la información descrita a continuación puede ser desarrollada por el laboratorio de calibración o por el usuario del instrumento. Los resultados no deben presentarse como parte del certificado de calibración, excepto para el caso del error de indicación aproximado y la incertidumbre del error aproximado, que pueden formar parte del certificado de calibración. Usualmente, la información relativa a la incertidumbre del resultado de una pesada, se presenta como un anexo del certificado de calibración, o en todo caso, se muestra de modo claramente separado de los resultados de calibración.

Las condiciones normales de uso del instrumento, asumidas o especificadas por

el usuario, pueden incluir:

Ajuste interno del instrumento disponible y activado ( $\Delta T \geq 3$  K).

Variación de la temperatura ambiente  $\Delta T = 10$  K.

Función de tara de la balanza operativa.

Cargas no siempre centradas cuidadosamente.

La incertidumbre del resultado de una pesada, se obtiene empleando una aproximación lineal del error de indicación, de acuerdo a (C2.2-16).

La incertidumbre del resultado de una pesada se presenta solamente para la opción 1 (no se emplea la corrección por empuje del aire a los valores del error de indicación). El error de indicación aproximado por (C2.2-16) y la incertidumbre del error de indicación aproximado por (C2.2-16d) difieren de manera insignificante entre ambas opciones dado que los factores de ponderación  $p_j = 1/u^2(E_j)$  difieren del orden de unas pocas partes por mil, y los errores de indicación son los mismos para ambas opciones (corrección por empuje del aire inferior a la resolución del instrumento).

Las designaciones  $R$  y  $W$  se introducen para diferenciarlas de la indicación del instrumento de pesaje  $I$  durante la calibración.

$R$ : Lectura obtenida cuando se coloca una carga sobre el instrumento después de su calibración.

$W$ : Resultado de la pesada

Nótese que en la siguiente tabla la lectura  $R$  y todos los resultados están en g.

Magnitud o influencia	Lectura, resultado de la pesada y error en g Incertidumbres en g o como valores relativos		Fórmula
Error de la indicación $E_{\text{appr}}(R)$ para lecturas brutas o netas: Aproximación por una línea recta que pasa por el cero	$E_{\text{appr}}(R) = 0$		C2.2-16
<b>Incertidumbre del error aproximado de la indicación</b>			
Incertidumbre típica del error $u(E_{\text{appr}})$	$u^2(E_{\text{appr}}) = 0 \times u^2(R) + 3,651 \times 10^{-9} R^2$		C2.2-16d
Incertidumbre típica del error, despreciando el término independiente	$u(E_{\text{appr}}) = 6,043 \times 10^{-5} R$		
<b>Incertidumbres debidas a la influencia de las condiciones ambientales</b>			
Deriva térmica de la sensibilidad	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{temp}}) = 1,732 \times 10^{-6}$		7.4.3-1
Empuje del aire	Irrelevante en este caso.		7.4.3-2
Cambio en el ajuste debido a la deriva	Irrelevante en este caso (ajuste interno activado y deriva entre calibraciones despreciable)		7.4.3-5
<b>Incertidumbres debidas al uso del instrumento</b>			
Operación de tara de la balanza	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{Tare}}) = 0$		7.4.4-5
Deriva bajo carga, histéresis (duración de la carga)	Irrelevante en este caso (corto periodo de carga).		7.4.4-9a/b
Carga descentrada	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = 1,443 \times 10^{-4}$		7.4.4-10
<b>Incertidumbre del resultado de una pesada, para intervalos de carga parciales (ICP)</b>			
Incertidumbre típica, correcciones a aplicar a las lecturas $E_{\text{appr}}$	ICP 1	$u(W) = \sqrt{(1,467 \text{ g}^2 + 2,449 \times 10^{-8} R^2)}$	7.4.5-1b
	ICP 2	$u(W) = \sqrt{(7,417 \text{ g}^2 + 2,449 \times 10^{-8} R^2)}$	
	ICP 3	$u(W) = \sqrt{(13,667 \text{ g}^2 + 2,449 \times 10^{-8} R^2)}$	
Incertidumbre expandida, correcciones a aplicar a las lecturas $E_{\text{appr}}$	ICP 1	$U(W) = 2\sqrt{(1,467 \text{ g}^2 + 2,449 \times 10^{-8} R^2)}$	7.5.1-2b
	ICP 2	$U(W) = 2\sqrt{(7,417 \text{ g}^2 + 2,449 \times 10^{-8} R^2)}$	
	ICP 3	$U(W) = 2\sqrt{(13,667 \text{ g}^2 + 2,449 \times 10^{-8} R^2)}$	
Simplificación a primer orden	ICP 1	$U(W) \approx 2,422 \text{ g} + 1,706 \times 10^{-4} R$	7.5.2-3f
	ICP 2	$U(W) \approx 6,616 \text{ g} + 2,355 \times 10^{-4} (R - 12\,000 \text{ g})$	
	ICP 3	$U(W) \approx 11,951 \text{ g} + 2,744 \times 10^{-4} (R - 30\,000 \text{ g})$	
<b>Incertidumbre global del resultado de una pesada sin corrección de las indicaciones</b>			
$U_{\text{gl}}(W) = U(W) +  E_{\text{appr}}(R) $	ICP 1	$U_{\text{gl}}(W) \approx 2,422 \text{ g} + 1,706 \times 10^{-4} R$	7.5.2-3a
	ICP 2	$U_{\text{gl}}(W) \approx 6,616 \text{ g} + 2,355 \times 10^{-4} (R - 12\,000 \text{ g})$	
	ICP 3	$U_{\text{gl}}(W) \approx 11,951 \text{ g} + 2,744 \times 10^{-4} (R - 30\,000 \text{ g})$	

La condición relativa al valor chi-cuadrado observado siguiendo (C2.2-2a) fue comprobada con resultado positivo. La primera regresión lineal tiene en cuenta los factores de ponderación  $p'_j$ , de acuerdo a la ecuación (C2.2-18b).

Basado en la incertidumbre global, el valor de pesada mínima del instrumento se puede obtener tal y como se indica en el anexo G.

Ejemplo:

Requisito de tolerancia de pesada: 1 %

Factor de seguridad: 2

La pesada mínima de acuerdo a la fórmula (G-9), empleando la ecuación mostrada anteriormente para la incertidumbre global en el ICP 1, es de 502 g; es decir, el usuario debe pesar una cantidad neta de material que exceda de 502 g, para obtener una incertidumbre de medida relativa (global), para un requisito de tolerancia de pesada relativa del 1 % y un factor de seguridad de 2 (equivalente a una tolerancia relativa de pesada de 0,5 %).

### **H3 Instrumento de 30 000 kg de capacidad, escalón de 10 kg**

#### **Nota preliminar:**

Se muestra la calibración de una báscula puente para vehículos de carretera. Este ejemplo muestra el procedimiento estándar completo para la presentación de los resultados de medida y las incertidumbres asociadas como las ejecutan muchos laboratorios.

Las cargas de ensayo deben ser, preferentemente, sólo pesas patrón que sean trazables a la unidad de masa del SI.

Este ejemplo muestra el uso de pesas patrón y de cargas de sustitución. El instrumento bajo calibración se usa como comparador para ajustar la carga de sustitución de modo que resulte aproximadamente la misma indicación que la carga correspondiente compuesta de pesas patrón.

**Primer caso: ajuste de la sensibilidad llevada a cabo de forma independiente a la calibración**

(Estado del instrumento: como se encontró)

**H3.1/A Condiciones específicas de la calibración**

<b>Instrumento</b>	<b>Instrumento de pesaje de funcionamiento no automático, electrónico, descripción e identificación</b> , con certificado de conformidad OIML R76 o aprobación de tipo según EN 45501 pero no verificado
<b>Alcance máximo Max / escalón d</b>	<b>30 000 kg / 10 kg</b>
Receptor de carga	3 m ancho, 10 m largo, 4 puntos de apoyo
Instalación	Exterior, al aire libre, a la sombra
Coeficiente de temperatura	$K_T = 2 \times 10^{-6}/K$ (manual del fabricante); sólo necesario para el cálculo de la incertidumbre de un resultado de pesada.
Dispositivo de ajuste interno	No incorporado.
<b>Ajuste del operador</b>	<b>No ajustado inmediatamente antes de la calibración.</b>
<b>Escalón durante los ensayos</b>	<b>Alta resolución (modo servicio), <math>d_T = 1</math> kg</b>
Duración de los ensayos	Desde las 9 h hasta las 13 h (Esta información puede ser útil en relación con posibles efectos de deriva bajo carga e histéresis)
<b>Temperatura durante la calibración</b>	<b>17°C al inicio de la calibración 20°C al final de la calibración</b>
<i>Presión barométrica y condiciones ambientales durante la calibración (opcional)</i>	1 010 hPa $\pm$ 5 hPa ;sin lluvia, sin viento
Cargas de ensayo	<p>Pesas patrón:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>10 pesas patrón paralelepípedicas, fundición de hierro, 1 000 kg cada una, certificadas a la tolerancia de clase <math>M_1 emp = 50</math> g (OIML R111 [4])</li> </ul> <p>Cargas de sustitución fabricadas de acero o hierro fundido:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2 contenedores de acero, rellenos de acero o hierro fundido suelto, peso de cada uno <math>\approx</math> 2 000 kg;</li> <li>2 contenedores de acero, rellenos de acero o hierro fundido suelto, peso de cada uno <math>\approx</math> 3 000 kg;</li> <li>Remolque para las pesas patrón o contenedores de acero, ajustado a un peso de <math>\approx</math> 10 000 kg;</li> <li>Pequeñas piezas metálicas, usadas para el ajuste de las cargas de sustitución.</li> </ul> <p>Elevación y medios para la maniobra de las pesas patrón y de las cargas de sustitución:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Carretilla elevadora, peso <math>\approx</math> 4 500 kg, capacidad 6 000 kg para mover pesas patrón y cargas de sustitución;</li> <li>Vehículo con remolque y grúa, capacidad de elevación 10 000 kg, para transporte y movimiento de pesas</li> </ul>

	patrón y cargas de sustitución.
--	---------------------------------

### H3.2/A Ensayos y resultados

<b>Repetibilidad</b>	<b>Carga de ensayo <math>\approx</math> 10 420 kg:</b>	<b>Carga de ensayo <math>\approx</math> 24 160 kg:</b>
Requisitos indicados en el apartado <b>5.1</b>	Carretilla elevadora con dos contenedores de acero, movidas de forma alternada de un extremo a otro del receptor de carga, carga centrada de manera visual	<i>Vehículo cargado que se mueve de forma alternada de un extremo al otro del receptor de carga, carga centrada de manera visual, (realizado alternativamente o adicionalmente)</i>
Indicación sin carga puesta a cero cuando sea necesario	10 405 kg	24 145 kg
	10 414 kg	24 160 kg
	10 418 kg	24 172 kg
	10 412 kg	24 152 kg
	10 418 kg	24 156 kg
	10 425 kg	24 159 kg
Después de la descarga, las indicaciones sin carga estaban entre 0 y 2 kg		
<b>Desviación típica</b>	<b><math>s = 6,74</math> kg</b>	<b><math>s = 9,03</math> kg</b>

<b>Excentricidad</b>	<b>Posición de la carga</b>	<b>Carga de ensayo <math>\approx</math> 10 420 kg:</b>
Requisitos indicados en el apartado <b>5.3</b>		Carretilla elevadora con contenedores de acero
Indicación puesta a cero antes de los ensayos; Carga puesta en el centro en primer lugar y posteriormente movida al resto de posiciones.	Centro	10 420 kg
	Frontal izquierda	10 407 kg
	Trasera izquierda	10 435 kg
	Trasera derecha	10 433 kg
	Frontal derecha	10 413 kg
<b>Diferencia máxima entre la indicación en el centro y las indicaciones descentradas</b> (en las cuatro esquinas)	$ \Delta I_{\text{eccí}} _{\text{max}}$	<b>15 kg</b>

<p><b>Excentricidad</b> (alternativamente o adicionalmente realizada con cargas rodantes)</p> <p>Requisitos indicados en el apartado <b>5.3</b></p> <p>Indicación puesta a cero antes de los ensayos y antes del cambio de dirección;</p>	<p><b>Posición de la carga</b></p>	<p><b>Carga de ensayo</b> ≈ <b>24 160 kg:</b> Vehículo más pesado y concentrado disponible</p>
	Izquierda	24 160 kg
	Centro	24 157 kg
	Derecha	24 181 kg
	(Cambio de dirección) Derecha	24 177 kg
	Centro	24 157 kg
	Izquierda	24 162 kg
<p><b>Diferencia máxima entre la indicación en el centro y las dos indicaciones descentradas</b> (a lo largo del eje longitudinal)</p>	$ \Delta I_{\text{ecc}i} _{\text{max}}$	<p><b>24 kg</b></p>

### Errores de indicación

Procedimiento estándar: Requisitos indicados en el apartado **5.2**, pesas distribuidas de forma bastante uniforme.

Cargas de ensayo formadas por sustitución, con 10 000 kg de pesas patrón (10 pesas × 1 000 kg) y 2 cargas de sustitución  $L_{\text{sub}1}$  y  $L_{\text{sub}2}$  de aproximadamente 10 000 kg cada una (el remolque y la suma de 4 contenedores). Cargas de ensayo aplicadas una vez; carga continua sólo creciente. Esto puede incluir efectos de deriva bajo carga e histéresis en los resultados, pero reduce la cantidad de cargas que se mueven dentro y fuera del receptor de carga.

Indicaciones después de retirar las pesas patrón anotadas, pero sin aplicar correcciones; todas las cargas dispuestas razonablemente alrededor del centro del receptor de carga.

Indicaciones anotadas:

<b>CARGA</b>				
<b>Pesas patrón</b> $m_N$	<b>Cargas de sustitución</b> $L_{sub}$	<b>Carga de ensayo total</b> $L_T = m_N + L_{sub}$	<b>Indicación</b> $I$	<b>Error de indicación</b> $E$
0 kg	0 kg	0 kg	0 kg	0 kg
5 000 kg $\frac{1}{2} m_{ref}$	0 kg	5 000 kg	5 002 kg $I(\frac{1}{2} m_{ref})$	2 kg
10 000 kg $m_{ref}$	0 kg	10 000 kg	10 010 kg $I(m_{ref})$	10 kg
0 kg	10 000 kg $L_{sub1}$	10 000 kg	10 010 kg $I(L_{sub1})$	10 kg
5 000 kg $\frac{1}{2} m_{ref}$	10 000 kg $L_{sub1}$	15 000 kg	15 015 kg $I(\frac{1}{2} m_{ref} + L_{sub1})$	15 kg
10 000 kg $m_{ref}$	10 000 kg $L_{sub1}$	20 000 kg	20 018 kg $I(m_{ref} + L_{sub1})$	18 kg
0 kg	20 010 kg $L_{sub1} + L_{sub2}$	20 010 kg	20 028 kg $I(L_{sub1} + L_{sub2})$	18 kg
5 000 kg $\frac{1}{2} m_{ref}$	20 010 kg $L_{sub1} + L_{sub2}$	25 010 kg	25 035 kg $I(\frac{1}{2} m_{ref} + L_{sub1} + L_{sub2})$	25 kg
10 000 kg $m_{ref}$	20 010 kg $L_{sub1} + L_{sub2}$	30 010 kg	30 040 kg $I(m_{ref} + L_{sub1} + L_{sub2})$	30 kg
0 kg	0 kg	0 kg	4 kg	4 kg $E_0$

Densidad del aire  $\rho_{as}$  durante el ajuste, desconocida y densidad del aire  $\rho_{aCal}$ , desconocida.

No se aplican correcciones por empuje del aire a los valores de error de indicación. Usando pesas patrón de clase  $M_1$  la incertidumbre relativa por efecto del empuje del aire se calcula de acuerdo a (7.1.2-5d) y es  $1,6 \times 10^{-5}$  (ya que el instrumento no se ajusta inmediatamente antes de la calibración). La incertidumbre es suficientemente pequeña, por lo que un cálculo más elaborado de esa componente de incertidumbre, basado en datos reales para la densidad del aire, es (la incertidumbre del empuje del aire es más pequeña que el escalón del modo de alta resolución  $d_T$  y es despreciable).

El límite de densidad para pesas patrón de clase  $M_1$  está establecido que sea  $\rho \geq 4\,400 \text{ kg m}^{-3}$  [4]. Este límite debe ser considerado también para las cargas de sustitución. En este caso, la incertidumbre relativa estimada para el efecto del empuje del aire de las cargas de sustitución es el mismo que el anterior (para pesas patrón) y es lo suficientemente pequeña; un cálculo más elaborado de esta componente de incertidumbre basado en los datos actuales es innecesario.

Nota: En la estimación de la densidad de las cargas de sustitución, es necesario tener en cuenta cualquier cavidad interna, que no esté abierta a la atmósfera (por ejemplo en tanques, depósitos). Es necesario estimar la densidad de una carga, como un todo, no suponer que tiene la misma densidad que el material del que se construye.

### H3.3/A Errores e incertidumbres asociadas (balance de incertidumbres asociadas)

Condiciones:

- La incertidumbre del error de cero sólo comprende la incertidumbre de la indicación sin carga (escalón  $d = 1$  kg) y la repetibilidad  $s$ . La incertidumbre de la indicación con carga no se tiene en consideración en cero.
- La carga descentrada se tiene en cuenta para la calibración de acuerdo a (7.1.1-10), porque no se puede excluir durante el ensayo de error de indicación. Si se han realizado los dos ensayos de excentricidad, entonces se deberían usar los valores relativos más altos.
- El error de indicación se obtiene utilizando el valor nominal de masa como valor de referencia, por lo tanto, los errores máximos permitidos de las cargas de ensayo se tienen en cuenta para obtener la contribución a la incertidumbre debida a la masa de referencia:  $u(\delta m_c)$  se calcula como  $u(\delta m_c) = emp/\sqrt{3}$  según la fórmula (7.1.2-3). Para cada pesa patrón de 1 000 kg  $u(\delta m_c) = 50/\sqrt{3} \approx 29$  g.
- En ausencia de información sobre la deriva, el valor de  $D$  se toma como  $D = emp$ . Para cada pesa patrón de 1 000 kg,  $emp = \pm 50$  g y  $u(\delta m_c) = 50/\sqrt{3} \approx 29$  g, según la fórmula (7.1.2-11).
- El instrumento no se ha ajustado inmediatamente antes de la calibración. Se aplica el procedimiento estándar, sin información a cerca de la densidad del aire. Por lo tanto, la fórmula (7.1.2-5d) se aplica a la incertidumbre debida al empuje del aire.
- La carga permanece en el receptor de carga durante un periodo de tiempo significativo durante la calibración. Basándonos en el apartado 7.1.1. que indica que se podrían tener en cuenta contribuciones adicionales a la incertidumbre, los efectos de deriva bajo carga e histéresis en los resultados se calculan de acuerdo a la fórmula (7.4.4-7) y se incluyen en la incertidumbre de la indicación.
- Las pesas están aclimatadas con una diferencia de temperatura residual de 5 K con la temperatura ambiente. Los efectos de convección no son relevantes (generalmente, sólo son relevantes para pesas de clase  $F_1$  o mejores).
- Los grados de libertad para el cálculo del factor de cobertura  $k$  se obtienen siguiendo el anexo B3 y la tabla G.2 de [1]. En el caso del ejemplo, la influencia de la incertidumbre del ensayo de repetibilidad con 6 medidas, es significativa.
- La información sobre la incertidumbre relativa  $U(E)_{rel} = U(E)/m_{ref}$  no es obligatoria, pero ayuda a demostrar las características de las incertidumbres.

Magnitud o influencia	Carga, indicación, error e incertidumbres en kg					Fórmula
<b>Carga de ensayo total</b> $L_T = m_N + L_{subj} / \text{kg}$	<b>0</b>	<b>5 000</b>	<b>10 000</b>	10 000*) $L_{sub1}$	<b>15 000</b>	
<b>Indicación <math>I / \text{kg}</math></b>	<b>0</b>	<b>5 002</b>	<b>10 010</b>	10 010 $I(m_{ref})$ $I(L_{sub1})$	<b>15 015</b>	
<b>Error de indicación <math>E / \text{kg}</math></b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	10 $\Delta I_1 = 0$	<b>15</b>	7.1-1
Repetibilidad $u(\delta I_{rep}) / \text{kg}$	6,74					7.1.1-5
Resolución $u(\delta I_{dig0}) / \text{kg}$	0,29					7.1.1-2a
Resolución $u(\delta I_{digL}) / \text{kg}$	0,00	0,29				7.1.1-3a
Excentricidad $u(\delta I_{ecc}) / \text{kg}$	0,00	2,08	4,16	4,16	6,24	7.1.1-10
Deriva bajo carga / histéresis $u_{rel}(\delta I_{time}) / \text{kg}$	0,00	0,38	0,77	0,77	1,16	7.4.4-7
Incertidumbre de la indicación $u(I) / \text{kg}$	6,75	7,08	7,97	7,97	9,27	7.1.1-12
<b>Pesas patrón <math>m_N / \text{kg}</math></b>	<b>0</b>	<b>5 000</b>	<b>10 000</b>	0	<b>5 000</b>	
Incertidumbre $u(\delta m_c) / \text{kg}$	0,00	0,14	0,29	0,00	0,14	7.1.2-3
Deriva $u(\delta m_D) / \text{kg}$	0,00	0,14	0,29	0,00	0,14	7.1.2-11
Empuje del aire $u(\delta m_B) / \text{kg}$	0,00	0,08	0,16	0,00	0,08	7.1.2-5d
Convección $u(\delta m_{conv}) / \text{kg}$	Irrelevante en este caso					7.1.2-13
Incertidumbre de la masa de referencia $u(m_{ref}) / \text{kg}$	0,00	0,22	0,44	0,00	0,22	7.1.2-14
<b>Cargas de sustitución</b> $L_{subj} / \text{kg}$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	10 000 $L_{sub1} =$ $m_{ref} + \Delta I_1$	<b>10 000</b> $L_{sub1}$	
Incertidumbre $u(L_{subj}) / \text{kg}$	0,00	0,00	0,00	11,28	11,28	7.1.2-15b
Empuje del aire $u(\delta m_B) / \text{kg}$	0,00	0,00	0,00	0,16	0,16	7.1.2-5d
Convección $u(\delta m_{conv}) / \text{kg}$	Irrelevante en este caso					
Incertidumbre de las cargas de sustitución $u(L_{subj}) / \text{kg}$	0,00	0,00	0,00	11,28	11,28	7.1.2-15b 7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E) / \text{kg}$	6,75	7,08	7,98	-----	14,60	7.1.3-1c
$\nu_{eff}$ (grados de libertad)	5	6	9	-----	109	B3-1
<b><math>k</math> (95,45 %)</b>	<b>2,65</b>	<b>2,52</b>	<b>2,32</b>	-----	<b>2,02</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E) / \text{kg}</math></b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	-----	<b>29</b>	7.3-1
$U_{rel}(E) / \%$	----	0,36	0,19	-----	0,20	

(continúa)

Magnitud o influencia	Carga, indicación, error e incertidumbres en kg				Fórmula
<b>Carga de ensayo total</b> $L_T = m_N + L_{subj}$ /kg	<b>20 000</b> $m_{ref2} + L_{sub2}$	20 010 <sup>*)</sup>	<b>25 010</b>	<b>30 010</b>	
<b>Indicación I</b> /kg	<b>20 018</b> $I(m_{ref2} + L_{sub2})$	20 028 $I(L_{sub1} + L_{sub2})$	<b>25 035</b>	<b>30 040</b>	
<b>Error de indicación E</b> /kg	<b>18</b>	18 $\Delta I_2 = 10$	<b>25</b>	<b>30</b>	7.1-1
Repetibilidad $u(\delta I_{rep})$ /kg	6,74				7.1.1-5
Resolución $u(\delta I_{dig0})$ /kg	0,29				7.1.1-2a
Resolución $u(\delta I_{digL})$ /kg	0,29				7.1.1-3a
Excentricidad $u(\delta I_{ecc})$ /kg	8,32	8,32	10,40	12,48	7.1.1-10
Deriva bajo carga / histéresis $u_{rel}(\delta I_{time})$ /kg	1,54	1,54	1,93	2,31	7.4.4-7
Incertidumbre de la indicación $u(I)$ /kg	10,82	10,82	12,54	14,38	7.1.1-12
<b>Pesas patrón <math>m_N</math></b> /kg	<b>10 000</b>	0	<b>5 000</b>	<b>10 000</b>	
Incertidumbre $u(\delta m_c)$ /kg	0,29	0,00	0,14	0,29	7.1.2-3
Deriva $u(\delta m_D)$ /kg	0,29	0,00	0,14	0,29	7.1.2-11
Empuje del aire $u(\delta m_B)$ /kg	0,16	0,00	0,08	0,16	7.1.2-5d
Convección $u(\delta m_{conv})$ /kg	Irrelevante en este caso.				7.1.2-13
Incertidumbre de la masa de referencia $u(m_{ref})$ /kg	0,44	0,00	0,22	0,44	7.1.2-14
<b>Cargas de sustitución <math>L_{subj}</math></b> /kg	<b>10 000</b> $L_{sub1}$	20 010 $L_{sub1} + L_{sub2} = 2m_{ref1} + \Delta I_2$	<b>20 010</b> $L_{sub1} + L_{sub2}$	<b>20 010</b> $L_{sub1} + L_{sub2}$	
Incertidumbre $u(L_{subj})$ /kg	11,28	19,02	19,02	19,02	7.1.2-15b
Empuje del aire $u(\delta m_B)$ /kg	0,16	0,32	0,32	0,32	7.1.2-5d
Convección $u(\delta m_{conv})$ /kg	Irrelevante en este caso.				
Incertidumbre de las cargas de sustitución $u(L_{subj})$ /kg	11,28	19,02	19,02	19,02	7.1.2-15b 7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E)$ /kg	15,64	-----	22,79	23,85	7.1.3-1c
$\nu_{eff}$ (grados de libertad)	144	-----	653	783	B3-1
<b>k (95,45 %)</b>	<b>2,02</b>	-----	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E)</math></b> /kg	<b>32</b>	-----	<b>46</b>	<b>48</b>	7.3-1
$U_{rel}(E)$ /%	0,16	-----	0,18	0,16	

\*) Los valores escritos en esta columna (para el mismo valor de carga total de la columna anterior, después de la sustitución de las pesas patrón por cargas de sustitución) no se indican en el certificado de calibración, pero se usarán en las siguientes columnas. Con el fin de recordar esto, el tipo de letra negrita no se utiliza en esta columna y las últimas 5 celdas están vacías.

Sería aceptable declarar en el certificado, sólo, el mayor valor de la incertidumbre expandida para todos los errores declarados:  $U(E) = 48$  kg, basado en  $k = 2$  acompañada de la afirmación de que la probabilidad de cobertura es, al menos, de un 95 %.

El certificado advertirá al usuario, de que la incertidumbre expandida indicada en el certificado, sólo es aplicable cuando se tiene en cuenta el error ( $E$ ).

### **H3.4/A Incertidumbre del resultado de una pesada**

Como se ha indicado en el apartado 7.4, la siguiente información puede ser desarrollada por el laboratorio de calibración o por el usuario del instrumento. Los resultados no deben ser presentados como parte del certificado de calibración, a excepción del error aproximado de indicación y la incertidumbre del error aproximado que puede formar parte del certificado. Por lo general, la información sobre la incertidumbre de un resultado de pesada se presenta como un anexo del certificado de calibración, o por otra parte, se muestra, si sus contenidos están claramente separados de los resultados de la calibración.

Las condiciones normales de uso del instrumento, como se supone, o según lo especificado por el usuario pueden incluir:

Variación de la temperatura  $\Delta T = 40$  K

Cargas no siempre centradas cuidadosamente

Dispositivo de tara accionado

Tiempo de carga: normal, que sea inferior que en la calibración

Lecturas en resolución normal,  $d = 10$  kg

El error de indicación a 30 000 kg es 30 kg y este valor se toma para el cambio en el ajuste debido a la deriva.

Las designaciones  $R$  y  $W$  se introducen para diferenciar de la indicación del instrumento de pesaje  $I$  durante la calibración.

$R$ : Lectura cuando se pesa una carga en el instrumento calibrado después de la calibración

$W$ : Resultado de pesada

Hay que tener en cuenta, que en el cuadro siguiente, la lectura  $R$  y todos los resultados están en kg.

Magnitud o influencia	Lectura, resultado de pesada y error en kg Incertidumbres en kg o como valor relativo	Fórmula
Error de Indicación $E_{appr}(R)$ para lecturas brutas o netas: Aproximación mediante línea recta que pasa por cero	$E_{appr}(R) = 9,379 \times 10^{-4} R$	C2.2-16
<b>Incertidumbre del error aproximado de indicación</b>		
Incertidumbre típica del error $u(E_{appr})$	$u(E_{appr}) = \sqrt{8,797 \times 10^{-7} u^2(R) + 1,316 \times 10^{-7} R^2}$	C2.2-16d
Incertidumbre típica del error, despreciando el término independiente	$u(E_{appr}) = 3,627 \times 10^{-4} R$	
<b>Incertidumbres debidas a la influencia de las condiciones ambientales</b>		
Deriva térmica de la sensibilidad	$u_{rel}(\delta R_{temp}) = \frac{2 \times 10^{-6} \times 40}{\sqrt{12}} = 2,309 \times 10^{-5}$	7.4.3-1
Empuje del aire	Irrelevante en este caso.	7.4.3-3
Cambio en el ajuste debido a la deriva (cambio de $E(Max)$ en 1 año = 30 kg)	$u_{rel}(\delta R_{adj}) =  30  / (30\ 000 \sqrt{3}) = 5,774 \times 10^{-4}$	7.4.3-6
<b>Incertidumbres de uso del instrumento</b>		
Uso de la tara	$u_{rel}(\delta R_{Tare}) = 3,457 \times 10^{-4}$	7.4.4-5
Deriva bajo carga, histéresis (tiempo de carga)	Irrelevante en este caso (tiempo de carga corto).	7.4.4-7
Excentricidad de la carga	$u_{rel}(\delta R_{ecc}) = 8,311 \times 10^{-4}$	7.4.4-10
<b>Incertidumbre del resultado de una pesada</b>		
Incertidumbre típica, correcciones a las lecturas $E_{appr}$ que deben ser aplicadas	$u(W) = \sqrt{(62,133 \text{ kg}^2 + 1,276 \times 10^{-6} R^2)}$	7.4.5-1a 7.4.5-1b
Incertidumbre expandida, correcciones a las lecturas $E_{appr}$ que deben ser aplicadas	$U(W) = 2 \sqrt{(62,133 \text{ kg}^2 + 1,276 \times 10^{-6} R^2)}$	7.5.1-2b
Simplificado al primer orden	$U(W) \approx 16 \text{ kg} + 1,79 \times 10^{-3} R$	7.5.2-3d
<b>Incertidumbre global del resultado de una pesada sin aplicar correcciones a las lecturas</b>		
$U_{gl}(W) = U(W) +  E_{appr}(R) $	$U_{gl}(W) \approx 16 \text{ kg} + 2,73 \times 10^{-3} R$	7.5.2-3a

La condición relativa al valor chi-cuadrado observado siguiendo (C2.2-2a) fue comprobada con resultado positivo. La primera regresión lineal tiene en cuenta los factores de ponderación  $p'_i$ , de acuerdo a la ecuación (C2.2-18b).

Basándose en la incertidumbre global, el valor de la pesada mínima para el instrumento se puede calcular de acuerdo con el Anexo G.

Ejemplo:

Requisitos de tolerancia en la pesada: 1 %

Factor de seguridad: 1

La pesada mínima de acuerdo a la fórmula (G-9), usando la ecuación mostrada anteriormente para los resultados de incertidumbre global, es de 2 169 kg; es decir, el usuario necesita pesar una cantidad neta de material que supere 2 169 kg, para conseguir una incertidumbre relativa de medida (global) para un requisito de tolerancia en la pesada de un 1 % y un factor de seguridad de 1.

Si se incluye un factor de seguridad, podría elegirse 2. Debido a la gran incertidumbre global, no podría asumirse un factor de seguridad más alto.

La pesada mínima de acuerdo con la fórmula (G-9), usando la ecuación mostrada anteriormente para los resultados globales de incertidumbre, es de 6 950 kg; es decir, el usuario tiene que pesar una cantidad neta de material que supere 6 950 kg, con el fin de lograr una relación de incertidumbre de medición (global) para un requisito de tolerancia en la pesada del 1 % y un factor de seguridad de 2 (es igual a una tolerancia relativa de pesada de 0,50 %).

**Segundo caso: ajuste de la sensibilidad llevada a cabo inmediatamente antes de la calibración**

(Previamente, se han realizado operaciones de reparación y mantenimiento sobre el instrumento)

**H3.1/B Condiciones específicas de la calibración**

<b>Instrumento:</b>	<b>Instrumento de pesaje de funcionamiento no automático, electrónico, descripción e identificación</b> , con certificado de conformidad OIML R76 o aprobación de modelo según EN 45501 pero no verificado
<b>Capacidad máxima de pesaje <math>Max</math> / escalón <math>d</math></b>	<b>30 000 kg / 10 kg</b>
Receptor de carga	3 m ancho, 10 m largo, 4 puntos de apoyo
Instalación	Exterior, al aire libre, a la sombra
Coeficiente de temperatura	$K_T = 2 \times 10^{-6}/K$ (manual del fabricante); sólo necesario para el cálculo de la incertidumbre de un resultado de pesada.
Dispositivo de ajuste interno	No incorporado.
<b>Ajuste del operador</b>	<b>Ajustado inmediatamente antes de la calibración.</b>
<b>Escalón durante los ensayos</b>	<b>Alta resolución (modo servicio), <math>d_T = 1</math> kg</b>
Duración de los ensayos	Desde las 14 h hasta las 18 h
<b>Temperatura durante la calibración</b>	<b>22°C al inicio de la calibración 18°C al final de la calibración</b>
<i>Presión barométrica durante la calibración</i>	1 010 hPa $\pm$ 5 hPa; <i>sin lluvia, sin viento</i>
Cargas de ensayo	<p>Pesas patrón:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>10 pesas patrón paralelepípedicas, fundición de hierro, 1 000 kg cada una, certificadas a la tolerancia de clase <math>M_1 emp = 50</math> g (OIML R111 [4])</li> </ul> <p>Cargas de sustitución fabricadas de acero o hierro fundido:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2 contenedores de acero, rellenos de acero o hierro fundido suelto, peso de cada uno <math>\approx</math> 2 000 kg;</li> <li>2 contenedores de acero, rellenos de acero o hierro fundido suelto, peso de cada uno <math>\approx</math> 3 000 kg;</li> <li>Remolque para las pesas patrón o contenedores de acero, ajustado a un peso de <math>\approx</math> 10 000 kg;</li> <li>Pequeñas piezas metálicas, usadas para el ajuste de las cargas de sustitución.</li> </ul> <p>Elevación y medios para la maniobra de las pesas patrón y de las cargas de sustitución:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Carretilla elevadora, peso <math>\approx</math> 4 500 kg, capacidad 6 000 kg para mover pesas patrón y cargas de sustitución;</li> <li>Vehículo con remolque y grúa, capacidad de elevación 10 000 kg, para transporte y movimiento de pesas patrón y cargas de sustitución.</li> </ul>

### H3.2/B Ensayos y resultados

<p><b>Repetibilidad</b></p> <p>Requisitos indicados en el apartado <b>5.1</b></p> <p>Indicación sin carga puesta a cero cuando sea necesario</p> <p>Después de la descarga, las indicaciones sin carga estaban entre 0 y 2 kg</p>	<p><b>Carga de ensayo <math>\approx</math> 10 420 kg:</b></p> <p>Carretilla elevadora con dos contenedores de acero, movidas de forma alternada de un extremo a otro del receptor de carga, carga centrada de manera visual</p>	<p><b>Carga de ensayo <math>\approx</math> 24 160 kg:</b></p> <p><i>Vehículo cargado que se mueve de forma alternada de un extremo al otro del receptor de carga, carga centrada de manera visual, (realizado alternativamente o adicionalmente)</i></p>
	10 415 kg	24 155 kg
	10 418 kg	24 160 kg
	10 422 kg	24 162 kg
	10 416 kg	24 152 kg
	10 422 kg	24 156 kg
	10 419 kg	24 159 kg
<b>Desviación típica</b>	$s = 2,94 \text{ kg}$	$s = 3,67 \text{ kg}$

<p><b>Excentricidad</b></p> <p>Requisitos indicados en el apartado <b>5.3</b></p> <p>Indicación puesta a cero antes de los ensayos; carga puesta en el centro en primer lugar y posteriormente movida al resto de posiciones.</p>	<p><b>Posición de la carga</b></p>	<p><b>Carga de ensayo <math>\approx</math> 10 420 kg:</b></p> <p>Carretilla elevadora con 2 contenedores de acero</p>
	Centro	10 420 kg
	Frontal izquierda	10 417 kg
	Trasera izquierda	10 423 kg
	Trasera derecha	10 425 kg
	Frontal derecha	10 425 kg
<p><b>Diferencia máxima entre la indicación en el centro y las indicaciones descentradas</b> (en las cuatro esquinas)</p>	$ \Delta I_{\text{ecc}} _{\text{max}}$	<p><b>5 kg</b></p>

<p><b>Excentricidad</b> (alternativamente o adicionalmente realizada con cargas rodantes)</p> <p>Requisitos indicados en el apartado <b>5.3</b></p> <p>Indicación puesta a cero antes de los ensayos y antes del cambio de dirección;</p>	<p><b>Posición de la carga</b></p>	<p><b>Carga de ensayo <math>\approx</math> 24 160 kg:</b></p> <p><i>Vehículo más pesado y concentrado posible</i></p>
	<i>Izquierda</i>	24 151 kg
	<i>Centro</i>	24 160 kg
	<i>Derecha</i>	24 169 kg
	(Cambio de dirección)	
	<i>Derecha</i>	24 167 kg
	<i>Centro</i>	24 160 kg
<i>Izquierda</i>	24 150 kg	
<p><b>Diferencia máxima entre la indicación en el centro y las dos indicaciones descentradas</b> (a lo largo del eje longitudinal)</p>	$ \Delta I_{\text{ecc}} _{\text{max}}$	<p><b>10 kg</b></p>

### Errores de indicación

Procedimiento estándar: Requisitos indicados en el apartado **5.2**, pesas distribuidas de forma bastante uniforme.

Cargas de ensayo formadas por sustitución, con 10 000 kg de pesas patrón (10 pesas  $\times$  1 000 kg) y dos cargas de sustitución  $L_{sub1}$  y  $L_{sub2}$  de aproximadamente 10 000 kg cada una (el remolque y la suma de 4 contenedores). Cargas de ensayo aplicadas una vez; carga continua sólo creciente. Esto puede incluir efectos de deriva bajo carga e histéresis en los resultados, pero reduce la cantidad de cargas que se mueven dentro y fuera del receptor de carga.

Indicaciones después de retirar las pesas patrón anotadas, pero sin aplicar correcciones; todas las cargas dispuestas razonablemente alrededor del centro del receptor de carga.

Indicaciones anotadas:

CARGA				
Pesas patrón $m_N$	Cargas de sustitución $L_{sub}$	Carga de ensayo total $L_T=m_N+L_{sub}$	Indicación $I$	Error de indicación $E$
0 kg	0 kg	0 kg	0 kg	0 kg
5 000 kg $\frac{1}{2} m_{ref}$	0 kg	5 000 kg	5 002 kg $I(\frac{1}{2} m_{ref})$	2 kg
10 000 kg $m_{ref}$	0 kg	10 000 kg	10 005 kg $I(m_{ref})$	5 kg
0 kg	10 000 kg $L_{sub1}$	10 000 kg	10 005 kg $I(L_{sub1})$	5 kg
5 000 kg $\frac{1}{2} m_{ref}$	10 000 kg $L_{sub1}$	15 000 kg	15 007 kg $I(\frac{1}{2} m_{ref}+L_{sub1})$	7 kg
10 000 kg $m_{ref}$	10 000 kg $L_{sub1}$	20 000 kg	20 008 kg $I(m_{ref}+L_{sub1})$	8 kg
0 kg	20 010 kg $L_{sub1}+L_{sub2}$	20 010 kg	20 018 kg $I(L_{sub1}+L_{sub2})$	8 kg
5 000 kg $\frac{1}{2} m_{ref}$	20 010 kg $L_{sub1}+L_{sub2}$	25 010 kg	25 020 kg $I(\frac{1}{2} m_{ref}+L_{sub1}+L_{sub2})$	10 kg
10 000 kg $m_{ref}$	20 010 kg $L_{sub1}+L_{sub2}$	30 010 kg	30 022 kg $I(m_{ref}+L_{sub1}+L_{sub2})$	12 kg
0 kg	0 kg	0 kg	4 kg	4 kg $E_0$

Densidad del aire  $\rho_{as}$  durante el ajuste, desconocida y densidad del aire  $\rho_{aCal}$ , desconocida.

No se aplican correcciones por empuje del aire a los valores de error de indicación. Utilizando pesas patrón de clase  $M_1$ , la incertidumbre relativa por efecto del empuje del aire se calcula de acuerdo a (7.1.2-5c) y es  $7,2 \times 10^{-6}$  (ya que el instrumento no se ajusta inmediatamente antes de la calibración). La incertidumbre es suficientemente pequeña, por lo que es innecesario un cálculo más elaborado de esa componente de incertidumbre basado en datos reales para la densidad del aire (la incertidumbre del empuje del aire es más pequeña que el escalón del modo de alta resolución  $d_T$  y es despreciable).

El límite de densidad para pesas patrón de clase  $M_1$  está establecido que sea  $\rho \geq 4\,400 \text{ kg m}^{-3}$  [4]. Este límite debe ser considerado también para las cargas de sustitución. En este caso, la incertidumbre relativa estimada para el efecto del empuje del aire de las cargas de sustitución es el mismo que el anterior (para pesas patrón) y es lo suficientemente pequeña; es innecesario un cálculo más elaborado de esta componente de incertidumbre basado en los datos actuales.

Nota: En la estimación de la densidad de las cargas de sustitución, es necesario tener en cuenta cualquier cavidad interna, que no esté abierta a la atmósfera (por ejemplo en tanques, depósitos). Es necesario estimar la densidad de una carga, como un todo, no suponer que tiene la misma densidad que el material del que se construye.

### H3.3/B Errores e incertidumbres asociadas (balance de incertidumbres asociadas)

Condiciones:

- La incertidumbre del error de cero sólo comprende la incertidumbre de la indicación sin carga (escalón  $d = 1 \text{ kg}$ ) y la repetibilidad  $s$ . La incertidumbre de la indicación con carga no se tiene en consideración en cero.
- La carga descentrada se tiene en cuenta para la calibración de acuerdo a (7.1.1-10) porque no se puede excluir durante el ensayo de error de indicación. Si se han realizado los dos ensayos de excentricidad, entonces se deberían usar los valores relativos más altos.
- El error de indicación se obtiene utilizando el valor nominal de masa como valor de referencia, por lo tanto, los errores máximos permitidos de las cargas de ensayo se tienen en cuenta para obtener la contribución a la incertidumbre debida a la masa de referencia:  $u(\delta m_c)$  se calcula como  $u(\delta m_c) = emp/\sqrt{3}$  según la fórmula (7.1.2-3). Para cada pesa patrón de 1 000 kg,  $u(\delta m_c) = 50/\sqrt{3} \approx 29 \text{ g}$ .
- En ausencia de información sobre la deriva, el valor de  $D$  se toma como  $D = emp$ . Para cada pesa patrón de 1 000 kg,  $emp = \pm 50 \text{ g}$  y  $u(\delta m_c) = 50/\sqrt{3} \approx 29 \text{ g}$ , según la fórmula (7.1.2-11).
- El instrumento se ha ajustado inmediatamente antes de la calibración. Se aplica el procedimiento estándar, sin información acerca de la densidad del aire. Por lo tanto, la fórmula (7.1.2-5c) se aplica a la incertidumbre debida al empuje del aire.
- La carga permanece en el receptor de carga durante un periodo de tiempo significativo durante la calibración. Basándonos en el apartado 7.1.1. que indica que se podrían tener en cuenta contribuciones adicionales a la incertidumbre, los efectos de deriva bajo carga e histéresis en los resultados se calculan de acuerdo a la fórmula (7.4.4-7) y se incluyen en la incertidumbre de la indicación.
- Las pesas están aclimatadas, con una diferencia de temperatura residual de 5 K con la temperatura ambiente. Los efectos de convección no son relevantes (generalmente, sólo son relevantes para pesas de clase  $F_1$  o mejores).
- Los grados de libertad para el cálculo del factor de cobertura  $k$  se obtienen siguiendo el anexo B3 y la tabla G.2 de [1]. En el caso del ejemplo, la influencia de la incertidumbre del ensayo de repetibilidad con 6 medidas, es significativa.
- La información sobre la incertidumbre relativa  $U(E)_{\text{rel}} = U(E)/m_{\text{ref}}$  no es obligatoria, pero ayuda a demostrar las características de las incertidumbres.

Magnitud o influencia	Carga, indicación, error e incertidumbres en kg					Fórmula
<b>Carga de ensayo total</b> $L_T = m_N + L_{subj} / \text{kg}$	<b>0</b>	<b>5 000</b>	<b>10 000</b>	10 000*) $L_{sub1}$	<b>15 000</b>	
<b>Indicación <math>I</math> /kg</b>	<b>0</b>	<b>5 002</b>	<b>10 005</b>	10 005 $I(m_{ref})$ $I(L_{sub1})$	<b>15 007</b>	
<b>Error de Indicación <math>E</math> /kg</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	5 $\Delta I_1 = 0$	<b>7</b>	7.1-1
Repetibilidad $u(\delta I_{rep}) / \text{kg}$	2,94					7.1.1-5
Resolución $u(\delta I_{dig0}) / \text{kg}$	0,29					7.1.1-2a
Resolución $u(\delta I_{digL}) / \text{kg}$	0,00	0,29				7.1.1-3a
Excentricidad $u(\delta I_{ecc}) / \text{kg}$	0,00	0,69	1,39	1,39	2,08	7.1.1-10
Deriva bajo carga / histéresis $u_{rel}(\delta I_{time}) / \text{kg}$	0,00	0,39	0,77	0,77	1,16	7.4.4-7
Incertidumbre de la indicación $u(I) / \text{kg}$	2,96	3,08	3,37	3,37	3,81	7.1.1-12
<b>Pesas patrón <math>m_N / \text{kg}</math></b>	<b>0</b>	<b>5 000</b>	<b>10 000</b>	0	<b>5 000</b>	
Incertidumbre $u(\delta m_c) / \text{kg}$	0,00	0,14	0,29	0,00	0,14	7.1.2-3
Deriva $u(\delta m_D) / \text{kg}$	0,00	0,14	0,29	0,00	0,14	7.1.2-11
Empuje del aire $u(\delta m_B) / \text{kg}$	0,00	0,04	0,07	0,00	0,04	7.1.2-5c
Convección $u(\delta m_{conv}) / \text{kg}$	Irrelevante en este caso					7.1.2-13
Incertidumbre de la masa de referencia $u(m_{ref}) / \text{kg}$	0,00	0,21	0,42	0,00	0,21	7.1.2-14
<b>Cargas de sustitución</b> $L_{subj} / \text{kg}$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	10 000 $L_{sub1} =$ $m_{ref} + \Delta I_1$	<b>10 000</b> $L_{sub1}$	
Incertidumbre $u(L_{subj}) / \text{kg}$	0,00	0,00	0,00	4,78	4,78	7.1.2-15b
Empuje del aire $u(\delta m_B) / \text{kg}$	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07	7.1.2-4
Convección $u(\delta m_{conv}) / \text{kg}$	Irrelevante en este caso					
Incertidumbre de las cargas de sustitución $u(L_{subj}) / \text{kg}$	0,00	0,00	0,00	4,78	4,78	7.1.2-15b 7.1.2.-4
Incertidumbre típica del error $u(E) / \text{kg}$	2,96	3,08	3,39	-----	6,12	7.1.3-1c
$\nu_{eff}$ (grados de libertad)	5	6	8	-----	93	B3-1
<b><math>k</math> (95,45 %)</b>	<b>2,65</b>	<b>2,52</b>	<b>2,32</b>	-----	<b>2,03</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E) / \text{kg}</math></b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	-----	<b>12</b>	7.3-1
$U_{rel}(E) / \%$	----	0,16	0,08	-----	0,08	

(continúa)

Magnitud o influencia	Carga, indicación, error e incertidumbres en kg				Fórmula
<b>Carga de ensayo total</b> $L_T = m_N + L_{subj} / \text{kg}$	<b>20 000</b> $m_{ref2} + L_{sub2}$	20 010*)	<b>25 010</b>	<b>30 010</b>	
<b>Indicación <math>I / \text{kg}</math></b>	<b>20 008</b> $I(m_{ref2} + L_{sub2})$	20 018 $I(L_{sub1} + L_{sub2})$	<b>25 020</b>	<b>30 022</b>	
<b>Error de indicación <math>E / \text{kg}</math></b>	<b>8</b>	8 $\Delta I_2 = 10$	<b>10</b>	<b>12</b>	7.1-1
Repetibilidad $u(\delta I_{rep}) / \text{kg}$	2,94				7.1.1-5
Resolución $u(\delta I_{dig0}) / \text{kg}$	0,29				7.1.1-2a
Resolución $u(\delta I_{digL}) / \text{kg}$	0,29				7.1.1-3a
Excentricidad $u(\delta I_{ecc}) / \text{kg}$	2,77	2,77	3,47	4,16	7.1.1-10
Deriva bajo carga / histéresis $u_{rel}(\delta I_{time}) / \text{kg}$	1,54	1,54	1,93	2,31	7.4.4-7
Incertidumbre de la indicación $u(I) / \text{kg}$	4,34	4,34	4,95	5,61	7.1.1-12
<b>Pesas patrón <math>m_N / \text{kg}</math></b>	<b>10 000</b>	0	<b>5 000</b>	<b>10 000</b>	
Incertidumbre $u(\delta m_c) / \text{kg}$	0,29	0,00	0,14	0,29	7.1.2-3
Deriva $u(\delta m_D) / \text{kg}$	0,29	0,00	0,14	0,29	7.1.2-11
Empuje del aire $u(\delta m_B) / \text{kg}$	0,07	0,00	0,04	0,07	7.1.2-5c
Convección $u(\delta m_{conv}) / \text{kg}$	Irrelevante en este caso.				7.1.2-13
Incertidumbre de la masa de referencia $u(m_{ref}) / \text{kg}$	0,42	0,00	0,21	0,42	7.1.2-14
<b>Cargas de sustitución <math>L_{subj} / \text{kg}</math></b>	<b>10 000</b> $L_{sub1}$	20 010 $L_{sub1} + L_{sub2} = 2m_{ref1} + \Delta I_2$	<b>20 010</b> $L_{sub1} + L_{sub2}$	<b>20 010</b> $L_{sub1} + L_{sub2}$	
Incertidumbre $u(L_{subj}) / \text{kg}$	4,78	7,80	7,80	7,80	7.1.2-15a
Empuje del aire $u(\delta m_B) / \text{kg}$	0,07	0,14	0,14	0,14	7.1.2-5c
Convección $u(\delta m_{conv}) / \text{kg}$	Irrelevante en este caso.				7.1.2-13
Incertidumbre de las cargas de sustitución $u(L_{subj}) / \text{kg}$	4,78	7,80	7,80	7,80	7.1.2-15a 7.1.2-4
Incertidumbre del error $u(E) / \text{kg}$	6,47	-----	9,24	9,62	7.1.3-1a
$\nu_{eff}$ (grados de libertad)	117	-----	486	569	B3-1
<b><math>k</math> (95,45 %)</b>	<b>2,02</b>	-----	<b>2,01</b>	<b>2,00</b>	[1]
<b><math>U(E) = ku(E) / \text{kg}</math></b>	<b>13</b>	-----	<b>19</b>	<b>19</b>	7.3-1
$U_{rel}(E) / \%$	0,06	-----	0,07	0,06	

\*) Los valores escritos en esta columna (para el mismo valor de carga total de la columna anterior, después de la sustitución de las pesas patrón por cargas de sustitución) no se indican en el certificado de calibración, pero se usarán en las siguientes columnas. Con el fin de recordar esto, el tipo de letra negrita no se utiliza en esta columna y las últimas 5 celdas están vacías.

Sería aceptable declarar en el certificado, sólo, el mayor valor de la incertidumbre expandida para todos los errores declarados:  $U(E) = 19 \text{ kg}$ , basado en  $k = 2$  acompañada de la afirmación de que la probabilidad de cobertura es, al menos, un 95 %.

El certificado incluirá el aviso al usuario, de que la incertidumbre expandida indicada en el certificado, sólo es aplicable cuando se tiene en cuenta el error ( $E$ ).

### H3.4/B Incertidumbre del resultado de una pesada

Como se ha indicado en el apartado 7.4, la siguiente información puede ser desarrollada por el laboratorio de calibración o por el usuario del instrumento. Los resultados no deben ser presentados como parte del certificado de calibración, a excepción del error aproximado de indicación y la incertidumbre del error aproximado que pueden formar parte del certificado. Por lo general, la información sobre la incertidumbre de un resultado de pesada se presenta como un anexo del certificado de calibración, o por otra parte, se muestra, si sus contenidos están claramente separados de los resultados de la calibración.

Las condiciones normales de uso del instrumento, como se supone, o según lo especificado por el usuario pueden incluir:

Variación de la temperatura  $\Delta T = 40$  K

Cargas no siempre centradas cuidadosamente

Dispositivo de tara accionado

Tiempo de carga: normal, que sea inferior que en la calibración

Lecturas en resolución normal,  $d = 10$  kg

Para el cambio del ajuste debido a la deriva, el error de indicación a 30 000 kg se asume que es 15 kg. Este es el *emp* en verificación inicial, considerando que el instrumento está en buenas condiciones después del mantenimiento y reparación.

Las designaciones  $R$  y  $W$  se introducen para diferenciar de la indicación del instrumento de pesaje  $I$  durante la calibración.

$R$ : Lectura cuando se pesa una carga en el instrumento calibrado después de la calibración

$W$ : Resultado de pesada

Hay que tener en cuenta que en el cuadro siguiente, la lectura  $R$  y todos los resultados están en kg.

Magnitud o influencia	Lecturas, resultado de pesada y error en kg Incertidumbres en kg o como valor relativo	Fórmula
Error de indicación $E_{appr}(R)$ para lecturas brutas o netas: Aproximación mediante línea recta que pasa por cero	$E_{appr}(R) = 4,280 \times 10^{-4} R$	C2.2-16
<b>Incertidumbre del error aproximado de indicación</b>		
Incertidumbre típica del error $u(E_{appr})$	$u^2(E_{appr}) = 1,832 \times 10^{-7} u^2(R) + 2,204 \times 10^{-8} R^2$	C2.2-16d
Incertidumbre típica del error, despreciando el término independiente	$u(E_{appr}) = 1,485 \times 10^{-4} R$	
<b>Incertidumbres debida a la influencia de las condiciones ambientales</b>		
Deriva térmica de la sensibilidad	$u_{rel}(\delta R_{temp}) = \frac{2 \times 10^{-6} \times 40}{\sqrt{12}} = 2,309 \times 10^{-5}$	7.4.3-1
Empuje del aire	Irrelevante en este caso.	7.4.3-3
Cambio en el ajuste debido a la deriva (cambio de $E(Max)$ en 1 año = 30 kg)	$u_{rel}(\delta R_{adj}) =  15  / (30\ 000 \sqrt{3}) = 2,887 \times 10^{-4}$	7.4.3-6
<b>Incertidumbres de uso del instrumento</b>		
Uso de la tara	$u_{rel}(\delta R_{Tare}) = 1,154 \times 10^{-4}$	7.4.4-5
Deriva bajo carga, histéresis (tiempo de carga)	Irrelevante en este caso (tiempo de carga corto).	7.4.4-7
Excentricidad de la carga	$u_{rel}(\delta R_{ecc}) = 2,770 \times 10^{-4}$	7.4.4-10
<b>Incertidumbre del resultado de una pesada</b>		
Incertidumbre típica, correcciones a las lecturas $E_{appr}$ que deben ser aplicadas	$u(W) = \sqrt{(25,333 \text{ kg}^2 + 1,960 \times 10^{-7} R^2)}$	7.4.5-1a 7.4.5-1b
Incertidumbre expandida, correcciones a las lecturas $E_{appr}$ que deben ser aplicadas	$U(W) = 2\sqrt{(25,333 \text{ kg}^2 + 1,960 \times 10^{-7} R^2)}$	7.5.1-2b
Simplificado al primer orden	$U(W) \approx 10,067 \text{ kg} + 6,113 \times 10^{-4} R$	7.5.2-3d
<b>Incertidumbre global del resultado de una pesada sin aplicar correcciones a las lecturas</b>		
$U_{gl}(W) = U(W) +  E_{appr}(R) $	$U_{gl}(W) \approx 10 \text{ kg} + 1,04 \times 10^{-3} R$	7.5.2-3a

La condición relativa al valor chi-cuadrado observado siguiendo (C2.2-2a) fue comprobada con resultado positivo. La primera regresión lineal tiene en cuenta los factores de ponderación  $p'_i$ , de acuerdo a la ecuación (C2.2-18b).

Basándose en la incertidumbre global, el valor de la pesada mínima para el instrumento se puede calcular de acuerdo con el Anexo G.

Ejemplo:

Requisitos de tolerancia en la pesada: 1 %

Factor de seguridad: 1

La pesada mínima de acuerdo a la fórmula (G-9), usando la ecuación mostrada anteriormente para los resultados de incertidumbre global es de 1 123 kg; es decir, el usuario necesita pesar una cantidad neta de material que supere 1 123 kg para conseguir una incertidumbre relativa de medida (global) para un requisito de tolerancia en la pesada de un 1% y un factor de seguridad de 1.

Si se incluye un factor de seguridad, podría elegirse 2. Debido a la gran incertidumbre global, no podría asumirse un factor de seguridad más alto.

La pesada mínima de acuerdo con la fórmula (G-9), usando la ecuación mostrada anteriormente para los resultados globales de incertidumbre, es de 2 542 kg; es decir, el usuario tiene que pesar una cantidad neta de material que supere 2 542 kg con el fin de lograr una relación de incertidumbre de medición (global), para un requisito de tolerancia en la pesada del 1 % y un factor de seguridad de 2 (es igual a una tolerancia relativa de pesada de 0,5 %).

### H3.5 Información adicional al ejemplo: detalles del procedimiento de sustitución (4.3.3)

Es muy recomendable conseguir que la carga de sustitución indique, en lo posible, el mismo valor que con pesas patrón (como se ha mostrado para la indicación de 10 005 kg en el segundo caso).

Para este propósito, la carga de sustitución se puede ajustar añadiendo o retirando pequeñas piezas metálicas, hasta que se obtenga el mismo valor de indicación (10 005 kg). El valor de la masa asignado a la primera carga de sustitución es  $L_{\text{sub1}} = m_N = 10\,000\text{ kg}$ .

Nota:  $m_N$  y  $m_{\text{ref}}$  se pueden usar como ( $m_{\text{ref}} = m_N$ ).

En la misma tabla se presenta la situación en la que no es posible ajustar la carga de sustitución para alcanzar el valor de indicación 20 008 kg. El valor de la masa asignado a la segunda carga de sustitución es  $L_{\text{sub2}} = m_N + I(L_{\text{sub2}}) - I(m_N) = 10\,000\text{ kg} + 20\,018\text{ kg} - 20\,008\text{ kg} = 10\,010\text{ kg}$  y la carga total de sustitución  $L_{\text{sub}}$  es  $L_{\text{sub}} = L_{\text{sub1}} + L_{\text{sub2}} = 20\,010\text{ kg}$ .

## H4 Determinación de la función de aproximación del error

### Nota preliminar:

En este ejemplo, se muestran el procedimiento principal para la determinación de los coeficientes de la función de calibración y la evaluación de las incertidumbres asociadas como se describen en el Anexo C.

### H4.1 Condiciones específicas para la calibración

<b>Instrumento</b>	<b>Instrumento de pesaje electrónico</b>
<b>Alcance máximo</b> <i>Max/escalón <math>d</math></i>	<b>400 g / 0,000 1 g</b>
<b>Ajuste por operador</b>	<b>Ajustado inmediatamente antes de la calibración (pesa de ajuste interna).</b>
<b>Condiciones de la sala</b>	<b>Temperatura 23 °C Densidad del aire <math>\rho_{aCal}=1,090 \text{ kg/m}^3</math>, <math>u(\rho_{aCal})=0,004 \text{ kg/m}^3</math></b>
<b>Cargas de ensayo / aclimatación</b>	<b>Pesas patrón, Clase E<sub>2</sub>, aclimatadas a la temperatura de la sala: <math>\delta m_{conv} = 0</math>; <math>u(\delta m_{conv}) = 0</math>.</b>

### H4.2 Ensayos y resultados de calibración

Ensayo de repetibilidad realizado a 200 g	$s(I) = 0,052 \text{ mg}$	7.1.1-5
Ensayo de excentricidad realizado a 200 g	$ \Delta I_{ecc} _{\max} = 0,10 \text{ mg}$ $u_{rel}(I_{ecc}) = 0,000 144$	7.1.1-11
Método de calibración	Cargas de ensayo aplicadas incrementando por etapas, sin descarga entre etapas separadas. Número de puntos de ensayo $n = 9$ . Número de ciclos $N = 3$ .	
Incertidumbre debida a la repetibilidad	$u(\delta I_{rep}) = s(I_j) / \sqrt{N} = 0,030 \text{ mg}$	7.1.1-6

### H4.3 Errores e incertidumbres asociadas (balance de incertidumbres asociadas)

Condiciones:

- La incertidumbre del error de cero comprende la incertidumbre de la indicación sin carga y la repetibilidad.
- Las cargas de excentricidad se tienen en cuenta para la calibración de acuerdo a (7.1.1-10)
- El error de indicación se obtiene usando el valor de calibración como valor de referencia, la contribución de la incertidumbre debida a la pesa de referencia viene dada en el certificado de calibración  $u(\delta m_c) = U/2$ .
- Además, la densidad del aire en el momento de la calibración  $\rho_{al}$  es conocida.
- La deriva de las pesas se estima por calibraciones sucesivas.

Los resultados son:

$m_N$	$m_c$ /g	$U(\delta m_c)$ /mg	$u(\delta m_D)$ /mg
50 g	50,000 006	0,030	0,005
100 g	99,999 987	0,050	0,010
200 g	200,000 013	0,090	0,015
200 g*	199,999 997	0,090	0,015

$$\rho_{Cal} = 8\,000 \text{ kg/m}^3, u(\rho_{Cal}) = 60 \text{ kg/m}^3$$

Calibración realizada con una densidad del aire  $\rho_{al} = 1,045 \text{ kg/m}^3$ .

De la ecuación (4.2.4-4)  $\delta m_B = 0$ , por lo tanto  $m_{ref} = m_c$ .

- Las pesas se han aclimatado a la temperatura ambiente, la variación de temperatura durante la calibración de la balanza es despreciable.
- La balanza se ajusta inmediatamente antes de la calibración y se determina la densidad del aire en el momento de la calibración.
- La incertidumbre del empuje del aire se calcula como:

$$u^2(\delta m_B) = m_N^2 u_{rel}^2(\delta m_B)$$

según (7.1.2-5b).

Nótese que en este ejemplo esta contribución es negativa, por esa razón, se da la contribución de la varianza en lugar de la incertidumbre.

**Cargas de 0 g a 200 g**

Magnitud o influencia	Carga e indicación en g Error e incertidumbre en mg					Fórmula
	0	50,000 006	99,999 987	149,999 993	200,000 013	
<b>Carga <math>m_{\text{ref}}</math> /g</b>						
<b>Indicación <math>I</math> /g</b> (valor medio)	<b>0,000 000</b>	<b>50,000 067</b>	<b>100,000 100</b>	<b>150,000 233</b>	<b>200,000 267</b>	
<b>Error de indicación <math>E</math> /mg</b>	<b>0,000</b>	<b>0,061</b>	<b>0,113</b>	<b>0,240</b>	<b>0,254</b>	7.1.1-1
<b>Repetibilidad <math>s</math> /mg</b>	<b>0,030</b>					7.1.1-6
Resolución $u(\delta I_{\text{dig}0})$ /mg	0,029					7.1.1-2a
Resolución $u(\delta I_{\text{dig}L})$ /mg	0,000	0,029				7.1.1-3a
Excentricidad $u(\delta I_{\text{ecc}})$ /mg	0,000	0,007	0,014	0,022	0,029	7.1.1-10
Incertidumbre de la indicación $u(I)$ /mg	0,042	0,051	0,053	0,055	0,058	7.1.1-12
Cargas de ensayo $m_N$ /g	0	50	100	100 50	200	
Pesas $u(\delta m_c)$ /mg	0,000	0,015	0,025	0,040	0,045	7.1.2-3
Deriva $u(\delta m_D)$ /mg	0,000	0,005	0,010	0,015	0,015	7.1.2-11
Empuje del aire $u^2(\delta m_B)$ /mg <sup>2</sup>	0,000	$-4,83 \times 10^{-5}$	$-1,93 \times 10^{-4}$	$-4,35 \times 10^{-4}$	$-7,73 \times 10^{-4}$	7.1.2-5b
Convección $u(\delta m_{\text{conv}})$ /mg	Irrelevante en este caso.					7.1.2-13
Incertidumbre de las pesas de referencia $u(m_{\text{ref}})$ /mg	0,000	0,014	0,023	0,037	0,038	7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E)$ /mg	0,042	0,053	0,058	0,067	0,070	7.1.3-1a

**Cargas de 250 g a 400 g**

Magnitud o influencia	Carga e indicación en g				Fórmula
	Error e incertidumbre en mg				
Carga $m_{ref} (m_N) / g$	250,000 019	300,000 000	350,000 006	400,000 010	
Indicación $I / g$	250,000 100	300,000 200	350,000 267	400,000 400	
Error de indicación $E / mg$	0,081	0,200	0,261	0,390	7.1-1
Repetibilidad $s / mg$	0,030				7.1.1-6
Resolución $u(\delta I_{dig0}) / mg$	0,029				7.1.1-2a
Resolución $u(\delta I_{digL}) / mg$	0,000	0,029			7.1.1-3a
Excentricidad $u(\delta I_{ecc}) / mg$	0,036	0,043	0,051	0,058	7.1.1-10
Incertidumbre de la indicación $u(I) / mg$	0,062	0,067	0,072	0,077	7.1.1-12
Cargas de ensayo $m_N / g$	50 200	100 200	50 100 200	200 200 *	
Pesas $u(\delta m_c) / mg$	0,060	0,070	0,085	0,090	7.1.2-3
Deriva $u(\delta m_c) / mg$	0,020	0,025	0,030	0,030	7.1.2-11
Empuje del aire $u^2(\delta m_B) / mg^2$	$-1,21 \times 10^{-3}$	$-1,74 \times 10^{-3}$	$-2,37 \times 10^{-3}$	$-3,09 \times 10^{-3}$	7.1.2-5b
Convección $u(\delta m_{conv}) / mg$	Irrelevante en este caso.				7.1.2-13
Incertidumbre de las pesas de referencia $u(m_{ref}) / mg$	0,053	0,062	0,076	0,077	7.1.2-14
Incertidumbre típica del error $u(E) / mg$	0,082	0,091	0,104	0,109	7.1.3-1a

A partir de los resultados de calibración se determina la función de calibración  $E = f(I)$ .

Como ejemplo se considera el modelo de regresión lineal  $E = a_1 I$ .

Los coeficientes  $a_1$  se determinan mediante la ecuación C2.2-6.

La Tabla H4.1 muestra la matriz  $X$  y el vector  $e$ . La matriz de covarianza correspondiente  $U(e)$  se proporciona en la Tabla H4.4, que está determinada por (C2.2-3a).

La Tabla H4.2 muestra la matriz de covarianza  $U(m_{ref})$ , que está determinada por (C2.2-3b), donde la columna vector  $s_{m_{ref}}$  viene dado por las incertidumbres de la masa de referencia  $u(m_{ref})$ .

La Tabla H4.3 muestra la matriz de covarianza  $U(I_{cal})$  que es una matriz diagonal que tiene en la diagonal los valores cuadrados de  $U(I_{cal})$ .

En un primer paso no se considera ninguna contribución para  $U(mod)$  ( $s_m = 0$ ).

Como el número de puntos de ensayo es  $n = 9$  y el número de parámetros es de  $n_{\text{par}} = 1$ , los grados de libertad son  $\nu = n - n_{\text{par}} = 8$ .

**Tabla H4.1: Matriz  $X$  y vector  $e$**

$X$ /g	$e$ /mg
0	0,000
50,000 067	0,061
100,000 100	0,213
150,000 233	0,274
200,000 267	0,254
250,000 100	0,181
300,000 200	0,200
350,000 267	0,261
400,000 400	0,390

**Tabla H4.2: Matriz de covarianza  $U(m_{\text{ref}})$**

0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	$2,017 \times 10^{-4}$	$3,274 \times 10^{-4}$	$5,294 \times 10^{-4}$	$5,457 \times 10^{-4}$	$7,503 \times 10^{-4}$	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,091 \times 10^{-3}$
0,000	$3,274 \times 10^{-4}$	$5,316 \times 10^{-4}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$
0,000	$5,294 \times 10^{-4}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$1,390 \times 10^{-3}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$
0,000	$5,457 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$1,477 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$
0,000	$7,503 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$2,792 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$
0,000	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$3,785 \times 10^{-3}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$
0,000	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$5,756 \times 10^{-3}$	$5,831 \times 10^{-3}$
0,000	$1,091 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$	$5,831 \times 10^{-3}$	$5,906 \times 10^{-3}$

**Tabla H4.3: Matriz de covarianza  $U(I_{\text{Cal}})$**

$1,735 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	$2,620 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	$2,776 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	$3,037 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	$3,401 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	$3,870 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	$4,443 \times 10^{-3}$	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	$5,120 \times 10^{-3}$	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	$5,901 \times 10^{-3}$

**Tabla H4.4: Matriz de covarianza  $U(e)$  con  $s_m = 0$**

$1,735 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	$2,822 \times 10^{-3}$	$3,274 \times 10^{-4}$	$5,294 \times 10^{-4}$	$5,457 \times 10^{-4}$	$7,503 \times 10^{-4}$	$8,736 \times 10^{-4}$	1,077E-03	1,091E-03
0,000	$3,274 \times 10^{-4}$	$3,308 \times 10^{-3}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$
0,000	$5,294 \times 10^{-4}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$4,427 \times 10^{-3}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$
0,000	$5,457 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$4,878 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$
0,000	$7,503 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$6,662 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$
0,000	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$8,228 \times 10^{-3}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$
0,000	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$1,088 \times 10^{-2}$	$5,831 \times 10^{-3}$
0,000	$1,091 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$	$5,831 \times 10^{-3}$	$1,181 \times 10^{-2}$

#### H4.4 Resultados

Aplicando (C2.2-6) y (C2.2-9), los resultados son

$$a_1 = 0,00083 \text{ mg/g}$$

La matriz de covarianza  $U(\hat{a})$  es

$$5,109 \times 10^{-8} \text{ (mg/g)}^2$$

A partir de la cual

$$u(a_1) = 0,00023 \text{ mg/g}$$

de (C2.2-8)

$$\chi^2_{\text{obs}} = 12,5$$

Como en este caso no se supera el test  $\chi^2$  (C2.2-2a), se añade una contribución a la incertidumbre  $s_m$ .

Considerando  $s_m = 0,05 \text{ mg}$ , la correspondiente matriz de covarianza  $U(mod)$  viene dada por una matriz  $9 \times 9$ , teniendo  $s_m^2 = 0,05^2$  en la diagonal. La tabla H4.5 muestra la correspondiente matriz de covarianza  $U(e)$ .

**Tabla H4.5: Matriz de covarianza  $U(e)$  evaluada con  $s_m = 0,05 \text{ mg}$**

$4,235 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	$5,322 \times 10^{-3}$	$3,274 \times 10^{-4}$	$5,294 \times 10^{-4}$	$5,457 \times 10^{-4}$	$7,503 \times 10^{-4}$	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,091 \times 10^{-3}$
0,000	$3,274 \times 10^{-4}$	5,808E-03	$8,596 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$
0,000	$5,294 \times 10^{-4}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$6,927 \times 10^{-3}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$
0,000	$5,457 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$7,378 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$
0,000	$7,503 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$9,162 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$
0,000	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$1,073 \times 10^{-2}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$
0,000	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$1,338 \times 10^{-2}$	$5,831 \times 10^{-3}$
0,000	$1,091 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$	$5,831 \times 10^{-3}$	$1,431 \times 10^{-2}$

Los nuevos resultados son

$$a_1 = 0,000\ 84\ \text{mg/g}$$

La matriz de covarianza  $U(\hat{a})$  es

$$5,637 \times 10^{-8}\ (\text{mg/g})^2$$

A partir de la cual

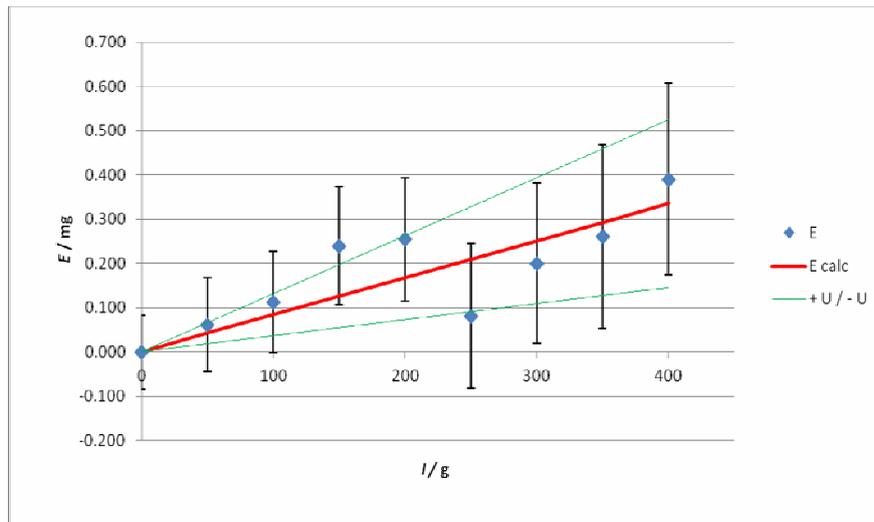
$$u(a_1) = 0,000\ 24\ \text{mg/g}$$

y

$$\chi_{\text{obs}}^2 = 7,3$$

En este caso, se supera el test  $\chi^2$  (C2.2-2a). El gráfico del resultado se muestra en la Figura H4-1.

**Figura H4-1: Errores de indicación medidos  $E$  y función de regresión lineal con las bandas de incertidumbre asociada**



Los residuos y las incertidumbres asociadas a los puntos de calibración se calculan con (C2.2-7) y (C2.2-11) respectivamente y se muestran en la Tabla H4.6.

**Tabla H4.6: Error calculado, residuos e incertidumbres asociadas a los puntos de calibración**

$I$ /g	$E$ /mg	$E_{\text{appr}}$ /mg	Residuo $v$ /mg	$u(E_{\text{appr}})$ /mg	$U(E_{\text{appr}})$ /mg	Test de residuos (C2.2-2b)
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Sí
50,000 067	0,061	0,042	-0,019	0,012	0,024	Sí
100,000 200	0,113	0,084	-0,029	0,024	0,047	Sí
150,000 267	0,240	0,126	-0,114	0,036	0,071	No
200,000 267	0,254	0,168	-0,086	0,047	0,095	Sí
250,000 200	0,081	0,210	0,129	0,059	0,119	No
300,000 200	0,200	0,252	0,052	0,071	0,142	Sí
350,000 267	0,261	0,293	0,032	0,083	0,166	Sí
400,000 400	0,390	0,335	-0,055	0,095	0,190	Sí

Si se sigue el método alternativo indicado en (C2.2-2b), que es mucho más restrictivo, nos se supera el test residual en dos puntos, de acuerdo a la Tabla H4.6.

Con el fin de obtener la bondad del ajuste, de acuerdo con la condición (C2.2-2b), es necesario tener en cuenta una contribución  $s_m = 0,25$  mg y, por lo tanto, se calcula una nueva matriz  $U(e)$ , que se proporciona en la Tabla H4.7.

**Tabla H4.7: Matriz de covarianza  $U(e)$  evaluada con  $s_m = 0,25$  mg**

$6,423 \times 10^{-2}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	$6,532 \times 10^{-2}$	$3,274 \times 10^{-4}$	$5,294 \times 10^{-4}$	$5,457 \times 10^{-4}$	$7,503 \times 10^{-4}$	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,091 \times 10^{-3}$
0,000	$3,274 \times 10^{-4}$	$6,581 \times 10^{-2}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$
0,000	$5,294 \times 10^{-4}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$6,693 \times 10^{-2}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$
0,000	$5,457 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$6,738 \times 10^{-2}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$
0,000	$7,503 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$6,916 \times 10^{-2}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$
0,000	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$7,073 \times 10^{-2}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$
0,000	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$7,338 \times 10^{-2}$	$5,831 \times 10^{-3}$
0,000	$1,091 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$	$5,831 \times 10^{-3}$	$7,431 \times 10^{-2}$

Con este enfoque el resultado es

$$a_1 = 0,000\ 84 \text{ mg/g}$$

La matriz de covarianza  $U(\hat{a})$  es

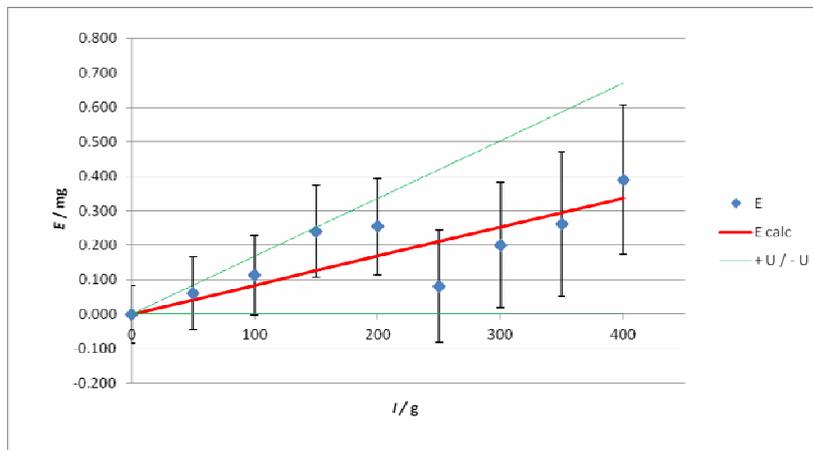
$$1,745 \times 10^{-7} \text{ (mg/g)}^2$$

Por lo tanto,

$$u(a_1) = 0,000\ 42 \text{ mg/g}$$

La gráfica de los resultados se muestra en la Figura H4-2. Los residuos calculados y las incertidumbres asociadas a los puntos de calibración, se muestran en la Tabla H4.8.

**Figura H4-2: Errores de indicación medidos  $E$  y función de regresión lineal con las bandas de incertidumbre asociada**



**Tabla H4.8: Error calculado, residuos e incertidumbres asociadas a los puntos de calibración**

$I$ /g	$E$ /mg	$E_{appr}$ /mg	Residuo $\nu$ /mg	$u(E_{appr})$ /mg	$U(E_{appr})$ /mg	Test de residuos
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Sí
50,000 067	0,061	0,042	-0,019	0,021	0,042	Sí
100,000 200	0,213	0,084	-0,029	0,042	0,084	Sí
150,000 267	0,274	0,126	-0,114	0,063	0,125	Sí
200,000 267	0,254	0,168	-0,086	0,084	0,167	Sí
250,000 200	0,181	0,210	0,129	0,104	0,209	Sí
300,000 200	0,200	0,252	0,052	0,125	0,251	Sí
350,000 267	0,261	0,294	0,033	0,146	0,292	Sí
400,000 400	0,390	0,336	-0,054	0,167	0,334	Sí



**CENTRO ESPAÑOL  
DE METROLOGÍA**

C/ Del Alfar, 2  
28760 Tres Cantos  
Madrid  
ESPAÑA

Tel: 918074700

Fax: 91 8074807

Correo electrónico: [cem@cem.es](mailto:cem@cem.es)

Internet: <http://www.cem.es>

**NIPO: 074-16-003-X**

