

GUÍA TÉCNICA DE TRAZABILIDAD E INCERTIDUMBRE EN LA MAGNITUD DE MASA

**(CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS PARA PESAR DE
FUNCIONAMIENTO NO AUTOMÁTICO)**

México 2008

Derechos reservados ©

PRESENTACIÓN

Para asegurar la uniformidad y validez técnica de la expresión de la trazabilidad de las mediciones y de la estimación de la incertidumbre de las mismas, la entidad mexicana de acreditación, a. c., solicitó al Centro Nacional de Metrología la revisión y elaboración de Guías Técnicas sobre Trazabilidad e Incertidumbre de las Mediciones.

Los Subcomités de evaluación de Laboratorios Acreditados de Calibración y de Ensayo de la entidad mexicana de acreditación se incorporaron a este proyecto transmitiendo sus conocimientos y experiencias relacionados con la trazabilidad e incertidumbre de sus mediciones.

El Centro Nacional de Metrología coordinó la elaboración de las Guías, proponiendo criterios técnicamente sustentados, procurando que las opiniones de los Subcomités fueran apropiadamente consideradas y asegurando la coherencia de las mismas con otros documentos técnicos de referencia.

Las Guías Técnicas de Trazabilidad e Incertidumbre de las Mediciones observan lo establecido en documentos de referencia conocidos ampliamente en la comunidad internacional, en los cuales se fundamentan las políticas de Trazabilidad e Incertidumbre de la entidad mexicana de acreditación.

Las Guías aportan criterios técnicos que sirven de apoyo a la aplicación de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006. La coherencia de las Guías con esta norma y con otros documentos de referencia, contribuye a asegurar la confiabilidad y uniformidad de las mediciones que realizan los laboratorios acreditados.

Abril de 2008.

Dr. Héctor O. Nava Jaimes

María Isabel López Martínez

Director General
Centro Nacional de Metrología

Directora Ejecutiva
entidad mexicana de acreditación, a. c.

AGRADECIMIENTOS

La entidad mexicana de acreditación expresa su reconocimiento al Fondo de Apoyo para la Micro, Pequeña y Mediana Empresa (FONDO PYME), auspiciado por la Secretaría de Economía, por haber proporcionado los recursos financieros para la elaboración de este documento, mediante el proyecto aprobado con folio FP2007-1605 de nombre “Elaboración de guías técnicas sobre trazabilidad e incertidumbre para la medición que permitan el fortalecimiento del Sistema Nacional de Acreditación de Laboratorios de Ensayo y Calibración” y por este medio hace patente su sincero reconocimiento y agradecimiento a la Secretaría de Economía, a la Subsecretaría para la Pequeña y Mediana Empresa, a la Dirección General de Desarrollo Empresarial y Oportunidades de Negocio, y a los profesionales que aportaron su tiempo y conocimiento en su desarrollo, destacando a los responsables de la elaboración:

GRUPO DE TRABAJO

El texto principal de esta Guía fue tomado, con autorización del SIM, de la “SIM Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments”, desarrollada por el grupo de trabajo SIM MWG7 Mass and Related Quantities coordinado por Luis Omar Becerra del Centro Nacional de Metrología, México. La Guía SIM toma como referencia el documento Euramet/cg-18/v.01 (originalmente EA-10/18) con la autorización de EURAMET (antes EUROMET). La Guía SIM actualiza al documento original en algunos aspectos e introduce ligeros cambios en fórmulas y ejemplos.

El grupo de trabajo que participó en la discusión y acuerdo para el establecimiento de esta Guía Técnica de Trazabilidad e Incertidumbre en la Magnitud de Masa (Calibración de Instrumentos para Pesar de Funcionamiento No –automático) fue:

BECERRA SANTIAGO, Luis Omar, - CENAM
RAMÍREZ MUÑOZ, Luis Manuel, - CENAM
BAEZA RIVERA, Carlos, - CENAM
ROSAS GARCÍA, Eva, - ema
MAEDA SANCHEZ, Sylvia, - Básculas Revuelta Maza, S.A. de C.V.
BOCARANDOU, Josefina, - CFE – Laguna Verde
CANALEJO CABRERA, Pablo, - IBSEI
CAMACHO MARQUEZ, Jorge, - Secretaría de Economía - DGN
Representantes del Subcomité de Masa – ema

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
GRUPO DE TRABAJO	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. ALCANCE	5
3. TERMINOLOGÍA Y SÍMBOLOS	6
4. ASPECTOS GENERALES DE LA CALIBRACIÓN.....	7
5. MÉTODOS DE MEDICIÓN.....	16
6. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN.....	19
7. INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN.....	22
8. INFORME O CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN	23
9. VALOR DE MASA O VALOR DE MASA CONVENCIONAL	23
10. REFERENCIAS	23
APÉNDICE A: SUGERENCIAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE AIRE	23
APÉNDICE B FACTOR DE COBERTURA k PARA LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DE LA MEDICIÓN.....	23
APÉNDICE C: FÓRMULAS PARA DESCRIBIR LOS ERRORES CON RELACIÓN A LAS INDICACIONES.....	23
APÉNDICE D: SÍMBOLOS Y TÉRMINOS	23
APÉNDICE E: INFORMACIÓN DEL EMPUJE DEL AIRE.....	23
APÉNDICE F: EFECTOS DE CONVECCIÓN	23
APÉNDICE G EJEMPLOS	23

1. INTRODUCCIÓN

Los instrumentos para pesar de funcionamiento no automático se utilizan ampliamente para determinar el valor de una carga en unidades de masa. Como los instrumentos que se utilizan en determinadas aplicaciones, especificadas en la Ley Federal de Metrología y Normalización, están sujetos a los controles metrológicos, que son: aprobación de modelo o prototipo, verificación inicial, periódica y extraordinaria, es necesario confirmar su calidad metrológica a través de la calibración, especialmente cuando lo requieran las normas NMX-EC-17025-IMNC-2006, ISO 9001 o ISO/IEC 17025.

2. ALCANCE

Este documento contiene los lineamientos para la calibración estática de los instrumentos para pesar de funcionamiento no automático de indicación automática (en adelante llamados “instrumentos”), en particular para

1. las mediciones que se deben realizar,
2. el cálculo de los resultados de la medición,
3. la determinación de la incertidumbre de la medición, y
4. el contenido de los certificados o informes de calibración.

Además, es complemento y no reemplaza a los criterios vigentes de aplicación de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006 para los laboratorios que calibran Instrumentos para pesar de funcionamiento no automático (IPFNA).

El objetivo de la calibración es la indicación proporcionada por el instrumento en respuesta a una carga aplicada. Los resultados se expresan en unidades del Sistema General de Unidades de Medida en la magnitud de masa. El valor de la carga indicado por el instrumento para pesar esta afectado por la gravedad local, densidad y temperatura de las cargas, así como la temperatura y densidad del aire circundante.

La incertidumbre de la calibración depende significativamente de las propiedades metrológicas del instrumento para pesar, no solo del equipo del laboratorio de calibración; ésta puede reducirse, incrementando el número de mediciones que se realizan en la calibración. Esta guía no especifica límites superiores o inferiores para la incertidumbre de la medición.

Es decisión del laboratorio de calibración y su cliente acordar anticipadamente el valor de la incertidumbre de medición que es apropiada teniendo en cuenta el uso del instrumento y el costo de la calibración.

El objetivo de esta Guía no es presentar uno o varios procedimientos uniformes cuyo uso sea obligatorio, este documento ofrece lineamientos generales para elaborar procedimientos de calibración cuyos resultados puedan ser considerados equivalentes dentro de las

organizaciones miembros del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) y entre los laboratorios de calibración acreditados por la entidad mexicana de acreditación, a.c. (ema).

Cualquier procedimiento debe considerar la determinación del error de indicación y su incertidumbre de medición para un número limitado de cargas de prueba.

El procedimiento debe reproducir las operaciones de pesada que realiza el usuario de manera rutinaria tanto como sea posible, por Ej. pesando cargas discretas de manera ascendente y/o descendente, usar la función de ajuste a cero (el dispositivo de equilibrio de tara).

El procedimiento puede incluir de manera adicional reglas partiendo de los resultados, asesorar al usuario del instrumento para pesar sobre los errores, y la incertidumbre de la medición asignada, de las indicaciones que puedan ocurrir bajo condiciones normales de uso del instrumento para pesar, y/o reglas para convertir una indicación derivada de la pesada de un cuerpo en el valor de masa convencional o en un valor de masa del objeto pesado.

La información que se presenta en esta guía, esta dirigida a, y debe ser observada por:

1. la(s) entidad(es) de acreditación de laboratorios para la calibración de instrumentos para pesar,
2. laboratorios de calibración acreditados para instrumentos para pesar de funcionamiento no automático,
3. laboratorios de prueba, fabricantes que utilizan instrumentos para pesar de funcionamiento no automáticos calibrados utilizados para realizar mediciones críticas para la calidad de una producción o servicio sujetos a los requisitos de aseguramiento de la calidad requisitos del Sistema de Calidad (por Ej. NMX-CC-9000-IMNC-2000 “Sistema de Gestión de la Calidad, Fundamentos y Vocabulario”, ISO 9000 serie, ISO 10012, ISO/IEC 17025)

El Apéndice D2 presenta un resumen de los principales términos y ecuaciones usados en esta Guía.

3. TERMINOLOGÍA Y SÍMBOLOS

Los términos usados en esta Guía se basan principalmente en los siguientes documentos:

- GUM [2] para los términos relacionados con la determinación de los resultados y la incertidumbre de la medición,
- OIML R 111-1 [4] para los términos relacionados con las pesas patrón,
- OIML R 76-1 [3] para los términos relacionados con el funcionamiento, la construcción y la caracterización metrológica de los instrumentos para pesar de funcionamiento no automáticos.
- VIM [8] para los términos relacionados con la calibración.

Los símbolos que no se explican en esta Guía y aparecen por primera vez, se indicará con su respectiva referencia. Aquellos que son utilizados en más de una sección, están concentrados en el apéndice D1.

4. ASPECTOS GENERALES DE LA CALIBRACIÓN

4.1 Elementos de calibración

La calibración consiste en

1. aplicar cargas de prueba al instrumento para pesar bajo condiciones específicas,
2. determinar el error o variación de la indicación, y
3. estimar la incertidumbre de la medición atribuible a los resultados.

4.1.1 Intervalo de calibración

A menos que el cliente lo requiera solicite algo diferente, una calibración debe abarcar todo el intervalo de pesada [3], desde cero hasta la “capacidad máxima” *Max*. El cliente puede especificar cierta parte del intervalo de pesada, con límites en la carga mínima *Min'* y la carga mayor de las cargas que quiera pesar *Max'*, o puede especificar ciertas cargas nominales individuales para las que requiere la calibración.

Para los instrumentos con intervalos múltiples de medición [3], el cliente debe identificar que intervalo(s) se deben calibrar. El párrafo anterior aplica a cada intervalo por separado.

4.1.2 Lugar de calibración

La calibración se realiza normalmente en el lugar donde se usa el instrumento para pesar.

Si un instrumento para pesar se mueve de lugar después de la calibración puede invalidarse debido a que el funcionamiento del instrumento puede ser alterado por la posible influencia de:

1. la diferencia en la aceleración de la gravedad local,
2. la variación en las condiciones ambientales,
3. las condiciones térmicas y mecánicas durante su transportación.

probablemente puede alterarse el funcionamiento del instrumento y posiblemente invalidar la calibración. Por este motivo se debe evitar mover el instrumento después de la calibración a menos que esté demostrada su inmunidad ante estos efectos. Cuando esto no pueda demostrarse el informe o certificado de calibración no debe aceptarse como evidencia de la trazabilidad.

4.1.3 Condiciones previas, preparaciones

La calibración no debe realizarse a menos que

1. el instrumento para pesar no pueda ser claramente identificado,
2. todas sus funciones del instrumento estén libres de efectos de contaminación o daño y las funciones esenciales necesarias para la calibración operen correctamente,

-
3. no exista ambigüedad en la presentación de los valores de pesada y las indicaciones puedan leerse con facilidad,
 4. las condiciones normales de uso (corrientes de aire, vibraciones, estabilidad del del sitio de pesada, etc.) sean apropiadas para el instrumento que se calibrará,
 5. En su caso, el instrumento haya sido energizado antes de la calibración, por Ej., un tiempo de calentamiento especificado para el instrumento o el tiempo establecido por el usuario basándose en las recomendaciones del fabricante,
 6. el instrumento sea nivelado, cuando aplique,
 7. el instrumento haya sido excitado con cargas de valor aproximado al alcance máximo al menos una vez, siendo recomendable repetir las cargas.

Los instrumentos para pesar diseñados para ajustarse antes de su calibración, a menos de que se acuerde con el cliente algo diferente. El ajuste se realizar con los medios que normalmente el cliente y siguiendo las instrucciones del fabricante, siempre que estén disponibles.

Se deben registrar los parámetros de configuración del instrumento que sean relevantes para los resultados de la calibración, del programa de cómputo (*software*), los cuales son susceptibles de alterarlos por parte del cliente.

Los instrumentos para pesar equipados con dispositivos de ajuste a cero automático [4] deben calibrarse con el dispositivo activado o no, según lo establezca el cliente.

Para una calibración “en sitio” se debe pedir al usuario del instrumento que garantice que las condiciones que prevalezcan en el momento de la calibración, sean las condiciones normales de uso. De esta manera las perturbaciones debidas a las corrientes de aire, vibraciones, o inclinaciones de la plataforma son las inherentes a los resultados de medición y deben incluirse en la incertidumbre de la medición determinada.

4.2 Carga de prueba e indicación

4.2.1 Relación básica entre carga e indicación

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

$$I \sim mg(1 - \rho_a / \rho) \quad (4.2.2-1)$$

donde

g	aceleración de gravedad local
ρ_a	densidad del aire ambiente
ρ	densidad del objeto

El término entre paréntesis representa la reducción de la fuerza debido al empuje del aire sobre el objeto.

4.2.2 El efecto del empuje del aire

Para ajustar o calibrar instrumentos para pesar se deben usar pesas patrones calibradas según su valor de masa convencional m_c^1 , el ajuste y/o la calibración de los instrumentos para pesar. El ajuste se realiza tal modo que los efectos reales de g y del empuje del aire sobre las pesas patrones m_{cs} queden incluidos en el factor de ajuste. Por eso, 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 $\rho_{as} \neq \rho_0$, identificados por el sufijo “s”, y es válido sólo para esas condiciones. Para otro cuerpo donde $\rho \neq \rho_s$, pesado en el mismo instrumento pero en condiciones diferentes: $g \neq g_s$ y $\rho_a \neq \rho_{as}$ la indicación en general es (despreciando los términos de segundo orden o mayores) es:

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

Si el instrumento no es reubicado, no habrá ninguna variación de g , así que $g/g_s = 1$. Esto es asumido en adelante.

Adicionalmente la fórmula se simplifica en situaciones donde algunos de los valores de densidad son iguales:

- a) al pesar un cuerpo con una densidad del aire igual a la densidad del aire de referencia: $\rho_a = \rho_0$, entonces

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

- b) pesando un cuerpo de la misma densidad que la pesa de ajuste: $\rho = \rho_s$, entonces:

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

- c) pesando un cuerpo en la misma densidad del aire al momento del ajuste:

$$\rho_a = \rho_{as}$$

entonces

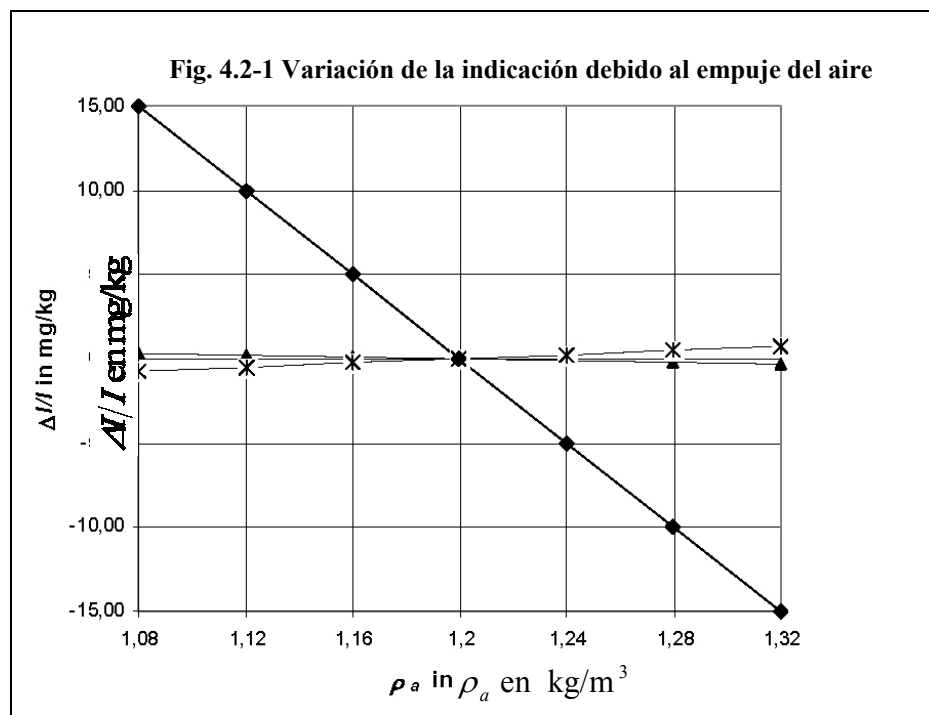
$$I = m_c \{1 - (\rho_a - \rho_0)(1/\rho - 1/\rho_s)\} \quad (4.2.2-6)$$

¹ El valor de masa convencional m_c de un cuerpo ha sido definido en [4] como el valor numérico de masa m de una pesa de densidad de referencia $\rho_c = 8\,000 \text{ kg/m}^3$ que equilibra al cuerpo a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ en aire cuya densidad ρ_0 :

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

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

La Figura 4.2-1 muestra ejemplos para la magnitud de los cambios relativos $\Delta I / I_s = (I - I_s) / I_s$ para un instrumento para pesar ajustado con pesas patrón de $\rho_s = \rho_c$, cuando es calibrado con pesas patrón de densidades diferentes pero típicas.



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

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

La línea ◆ es válida para un cuerpo de $\rho = \rho_s = \rho_c$ después de ajuste en $\rho_{as} = \rho_0$

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

En los apéndices A y E, se proporciona información adicional sobre la densidad de aire y sobre el empuje de aire sobre las pesas patrones, respectivamente.

4.2.3 Efectos de convección

Cuando se transportan las pesas al lugar de calibración, su temperatura posiblemente puede ser diferente a la del instrumento y el ambiente. En este caso se deben notar dos fenómenos:

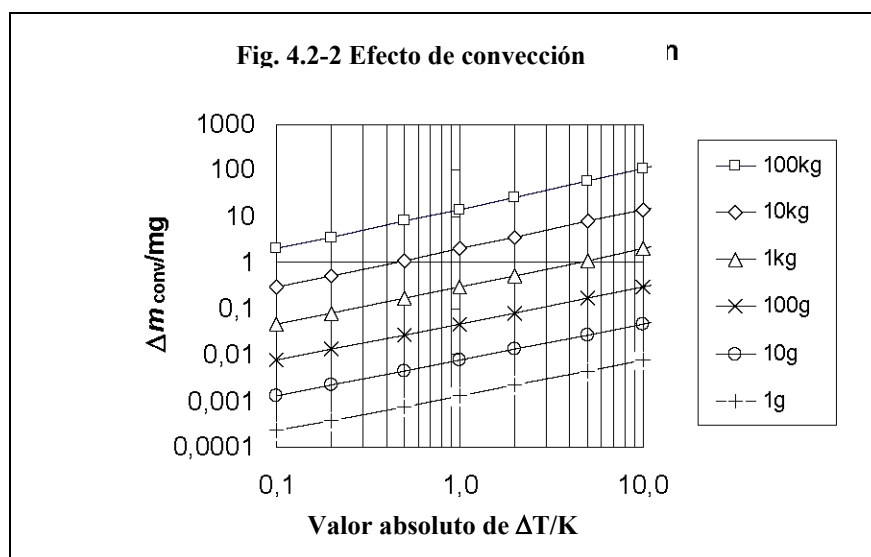
Se puede reducir la diferencia de temperatura inicial ΔT_0 a un valor ΔT más pequeño ambientando las pesas durante un periodo de Δt ; lo que ocurre más rápidamente para las pesas pequeñas que para las pesas mas grandes.

Cuando se coloca una pesa sobre el receptor de carga del instrumento, la diferencia

correspondiente de ΔT provoca corrientes de aire que fluyen alrededor de la pesa generando fuerzas parásitas resultando un cambio aparente de su masa Δm_{conv} . El signo de Δm_{conv} generalmente es opuesto al signo de ΔT , y su valor es mayor para las pesas grandes que para las pesas mas pequeñas.

La relación entre cualquiera de las magnitudes mencionadas: ΔT_0 , Δt , ΔT , m y Δm_{conv} son no lineales y dependen de las condiciones del intercambio térmico entre las pesas y el ambiente – ver [9].

La Figura 4.2-2 nos muestra la magnitud del cambio aparente de masa en relación con respecto a la diferencia de temperatura para algunas pesas seleccionadas.



Este efecto debe tomarse en cuenta tanto para ambientar las pesas hasta que el cambio de Δm_{conv} sea despreciable con respecto a la incertidumbre de calibración requerida por el cliente, como para considerar el posible cambio de la indicación en el presupuesto de incertidumbres. El efecto puede ser significativo para pesas de alta exactitud, por Ej. para pesas de clase E₂ o F₁ de la OIML R 111-1 [4].

El Apéndice F ofrece información mas detallada.

4.2.4 Valor de masa de referencia

Las relaciones generales de (4.2.2-3) hasta (4.2.2-6) aplican también si el “objeto pesado” es una pesa patrón utilizada para la calibración.

Para determinar los errores de las indicaciones de un instrumento para pesar, se aplican pesas patrón con un valor de masa convencional conocido m_{cCal} . Su densidad ρ_{Cal} normalmente es diferente del valor de referencia ρ_c y la densidad de aire ρ_{aCal} normalmente es diferente de ρ_0 al momento de la calibración.

El error E de indicación es

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

donde m_{ref} es un valor convencionalmente verdadero de masa, en adelante llamado valor de masa de referencia. Debido a los efectos del empuje de aire, la convección, la deriva y otros pueden resultar términos menores de corrección δm_x , m_{ref} no es exactamente igual a m_{cCal} :

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

La corrección por empuje de aire δm_B está afectada por los valores de ρ_s y ρ_{as} , que fueron considerados válidos para el ajuste pero normalmente no son conocidos. Se supone que se usan pesas con densidad de referencia $\rho_s = \rho_c$ (4.2.2-3) de modo que la expresión general para 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 de aire ρ_{as} se consideran dos situaciones:

A El instrumento fue ajustado inmediatamente antes de la calibración, tal que $\rho_{as} = \rho_{aCal}$. Eso simplifica (4.2.4-3) a:

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

B El instrumento fue ajustado independientemente de la calibración, en un ambiente con densidad de aire ρ_{as} desconocida, cuyo valor debe asumirse razonablemente.

B1 Las calibraciones "en sitio", deben esperarse para que ρ_{as} sea similar a ρ_{aCal} , con una diferencia posible de $\delta\rho_{as} = \rho_{aCal} - \rho_{as}$. En este caso (4.2.4-3) queda de la forma:

$$\delta m_B = -m_{cCal} [(\rho_{aCal} - \rho_0)(1/\rho_{cCal} - 1/\rho_c) + \delta\rho_{as}/\rho_c] \quad (4.2.4-5)$$

B2 Una posible suposición que $\rho_{as} = \rho_0$, de modo que:

$$\delta m_B = -m_{cCal} (\rho_{aCal} - \rho_0)/\rho_{cCal} \quad (4.2.4-6)$$

Para mayor información vea también los apéndices A y E.

Otros términos de corrección, se tratarán en la sección 7.

Para evitar confusión, el sufijo "Cal" se omitirá a menos que sea necesario mencionarlo.

4.3 Cargas de prueba

Las cargas de prueba deben conformarse preferiblemente con pesas patrones con trazabilidad a la unidad de masa del Sistema Internacional de Unidades (SI). No obstante,

pueden emplearse otras cargas de prueba para someter al instrumento a precargas o para las pruebas de repetibilidad, excentricidad, pruebas de tara, o cuando se requieren cargas de sustitución.

4.3.1 Pesas patrones

La trazabilidad de las pesas usadas como patrones debe cumplirse a través de una calibración² que consista en:

1. la determinación del valor de masa convencional m_c y/o la corrección δm_c con respecto a su valor nominal m_N : $\delta m_c = m_c - m_N$, así como de la incertidumbre expandida de la calibración U_{95} , o
2. la confirmación de que m_c está dentro de los errores máximos tolerados permitidos especificados
 $mpe: m_N - (mpe - U_{95}) < m_c < m_N + (mpe - U_{95})$

Además los patrones en dependencia de su exactitud, deben satisfacer además los siguientes requisitos:

3. la densidad ρ_s lo suficientemente cercana a $\rho_c = 8\,000\text{ kg/m}^3$
4. el acabado superficial adecuado para evitar un cambio de masa debido a la contaminación por suciedad o capas de adherencia
5. las propiedades magnéticas convenientes para que la interacción con el instrumento se minimice.

Las pesas que cumplen con las especificaciones relevantes de la recomendación internacional OIML R 111-1 [4] deben satisfacer todos esos requisitos.

Los errores máximos tolerados, o las incertidumbres de calibración de las pesas patrones deben ser compatibles con el valor de la división de escala d [3] del instrumento para pesar y/o las necesidades del cliente con respecto a la incertidumbre de la calibración del instrumento.

4.3.2 Otras cargas de prueba

Para ciertas aplicaciones mencionadas en la segunda oración de 4.3, no es esencial que el valor convencional de masa de la carga de prueba sea conocido. En esos casos, se pueden usar cargas diferentes a las pesas patrón considerando lo siguiente:

1. la forma, el material, y la aleación debe permitir el fácil manejo,

² ILAC-P 10-2002, nr. 2(b): Trazabilidad debe derivarse donde sea posible,...“de un laboratorio de calibración que puede demostrar competencia, capacidad de medir y trazabilidad con una incertidumbre de medición apropiada, por Ej. un laboratorio de calibración acreditado...” y Nota 3: ILAC reconoce y acepta algunas calibraciones económicas que sean realizadas por autoridades de verificación nombradas bajo el marco de la metrología Legal”.

2. la forma, el material, y la composición debe permitir la fácil estimación de la posición del centro de gravedad,
 3. su masa debe permanecer constante durante todo el período de la calibración,
 4. su densidad debe ser fácil de estimar,
 5. las cargas de baja densidad (por Ej. contenedores llenos de arena o grava) requieren atención especial debido al empuje de aire.
- La temperatura y la presión barométrica deben vigilarse o monitorearse durante todo el período en que se usen estas cargas para la calibración.

4.3.3 Uso de cargas de sustitución

Cuando se requiere conocer el valor de masa convencional de una carga de prueba, esta debe conformarse totalmente con pesas. Cuando lo anterior no sea posible, se puede usar cualquiera de las cargas especificadas en 4.3.2 como carga de sustitución. Se debe usar el instrumento que se calibra como comparador para ajustar la carga de sustitución L_{sub} de tal manera la indicación correspondiente I sea aproximadamente igual a la que corresponde a la carga L_{St} conformada con patrones.

La primera carga de prueba L_{T1} conformada con patrones de masa m_{c1} provoca la indicación:

$$I(L_{St}) = I(m_{c1}) \quad (4.3.3-1)$$

Después de retirar L_{St} se debe colocar la carga de sustitución L_{sub1} que debe ajustarse hasta obtener aproximadamente la misma indicación:

$$I(L_{sub1}) \approx I(m_{c1}) \quad (4.3.3-2)$$

de manera que

$$L_{sub1} = m_{c1} + I(L_{sub1}) - I(m_{c1}) = m_{c1} + \Delta I_1 \quad (4.3.3-3)$$

La siguiente carga de prueba L_{T2} se conforma añadiendo m_{c1}

$$L_{T2} = L_{sub1} + m_{c1} = 2m_{c1} + \Delta I_1 \quad (4.3.3-4)$$

m_{c1} se reemplaza nuevamente por una carga de sustitución de $\approx L_{sub1}$ ajustando a $\approx I(L_{T2})$.

El procedimiento se puede repetir para generar cargas de prueba $LT3$, LTn :

$$L_{Tn} = nm_{c1} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \dots + \Delta I_{n-1} \quad (4.3.3-5)$$

El valor de L_{Tn} se toma como el valor de masa convencional m_c de la carga de prueba.

No obstante, con cada paso de sustitución, la incertidumbre de la carga de prueba aumenta considerablemente más que si se hubiera realizado solo con pesas patrón. Ese efecto se debe

a los efectos de repetibilidad y resolución del instrumento para pesar. – consulte también 7.1.2.6³.

4.4 Indicaciones

4.4.1 En general

Cualquier indicación I relacionada con una carga de prueba es básicamente la diferencia de las indicaciones bajo carga I_L y sin carga I_0 :

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

En todas las pruebas es conveniente registrar las indicaciones sin carga y con carga. No obstante, el registro de la indicación sin carga no es necesario cuando el procedimiento establece el ajuste a cero de cualquier indicación del instrumento sin carga antes de aplicar cualquier carga.

Para todas las cargas de prueba incluyendo cero, la lectura y el registro de la indicación I se realiza solo cuando se considere estable. Si la resolución del instrumento para pesar es muy buena o las condiciones ambientales del lugar de la calibración no permiten que las indicaciones sean estables, se debe registrar el valor promedio de las indicaciones y su variabilidad (por Ej. para valores dispersos como cuando hay una deriva unidireccional).

Durante las pruebas de calibración, se deben registrar las indicaciones originales, no los errores o variaciones de la indicación.

4.4.2 Resolución

Las indicaciones se obtienen normalmente como un número entero múltiplo de la división de escala d .

A discreción del laboratorio de calibración y con la aprobación del cliente se pueden aplicar métodos alternativos para obtener las indicaciones con una mejor resolución que d , por Ej. cuando se comprueba el cumplimiento de una especificación y se requiere una menor incertidumbre. Las alternativas pueden ser:

1. cambiar el valor de la división de escala configurado en el dispositivo de indicación a un valor mas pequeño $d_T < d$ (“modo de servicio”).
En este caso la indicación I_x se obtiene como múltiplo entero de d_T .
2. añadir sucesivamente pequeñas cargas de prueba con valor nominal equivalente a $d_T = d/5$ o $d/10$ para determinar con mayor exactitud la carga para la cual la indicación cambia sin ambigüedades de I' a $I' + d$. (“método de cambio de

³ Ejemplo: un instrumento para pesar con $Max = 5000$ kg, $d = 1$ kg, la incertidumbre estándar de 5 t de pesas patrón puede ser 200 g, mientras que la incertidumbre estándar de una carga de prueba hecho de 1 t de pesas patrón y 4 t de carga de sustitución será alrededor de 2 kg

resolución”). En este caso la indicación I' se registra conjuntamente con la suma n de las cargas añadidas ΔL para lograr el cambio de la indicación de I' a d . La indicación I_L se determina por:

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

Se recomienda se aplicar el método de cambio de resolución, tanto para las indicaciones con carga, así como para las indicaciones sin carga.

5. MÉTODOS DE MEDICIÓN

Las pruebas normalmente se realizan para determinar

la repetibilidad de las indicaciones,
los errores de las indicaciones,
el efecto en la indicación de la aplicación excéntrica de una carga.

Para determinar el número de mediciones que se debe especificar en el procedimiento de calibración, el laboratorio debe considerar que cuando se realizan muchas mediciones, la incertidumbre de medición disminuye pero se elevan los costos.

El cliente y el laboratorio de calibración deben acordar los detalles de las pruebas para una calibración individual, considerando el uso normal del instrumento. Las partes también deberán acordar las pruebas o verificaciones adicionales que puedan apoyar en la evaluación de desempeño del instrumento bajo las condiciones especiales de uso. Tal acuerdo debe ser consistente con el número mínimo de pruebas tal y como está especificado en las secciones siguientes.

5.1 Prueba de repetibilidad

La prueba consiste en la colocación repetitiva de la misma carga en el receptor de carga, bajo condiciones idénticas de manejo de la carga y del instrumento, y bajo las mismas condiciones de prueba, tanto como sea posible.

La(s) carga(s) de prueba no requiere (n) ser calibrada(s) ni verificada(s) a menos que los resultados sirvan para la determinación de errores de indicación conforme a 5.2. La carga de prueba debe ser, hasta donde sea posible, una sola pieza.

La prueba se realiza al menos una carga de prueba L_T seleccionada a partir de una relación razonable entre Max y la resolución del instrumento, que permita evaluar el funcionamiento del instrumento. Para instrumentos con división de escala d constante, es apropiado usar una carga de $0,5Max \leq L_T \leq Max$ esta carga puede reducirse si $L_T > 0,5Max$ asciende a varias toneladas. Para los instrumentos multi-intervalo [3] se prefiere usar una carga cercana a Max_1 . Se puede acordar entre las partes, usar una carga L_T diferente siempre que se justifique a partir de la aplicación específica del instrumento.

La prueba se puede realizar en varios puntos de prueba, con cargas de prueba L_{Tj} , $1 \leq j \leq k_L$ con k_L = número de puntos de prueba.

Antes de la prueba, la indicación se ajusta a cero. La carga se tiene que aplicar por lo menos 5 veces, y al menos 3 veces cuando $L_T \geq 100$ kg.

Se registran las indicaciones correspondientes I_{Li} a cada carga colocada. Después de retirar las cargas se debe revisar la indicación cero y ajustarla a cero si es necesario; se aconseja registrar la indicación sin carga I_{0i} como se indica en 4.4.1. Adicionalmente, se debe registrar el estado de la fijación del dispositivo cero cuando aplique.

5.2 Prueba para los errores de las indicaciones

Esta prueba se realiza con $k_L \geq 5$ cargas de prueba diferentes L_{Tj} , $1 \leq j \leq k_L$, distribuidas casi simétricamente a lo largo del intervalo normal de pesada⁴ o en puntos de prueba individuales acordados según lo establecido en 4.1.2.

El objetivo de esta prueba es evaluar el comportamiento del instrumento a lo largo del intervalo de pesada.

Cuando se haya acordado un intervalo de calibración reducido, se puede reducir el número de cargas de prueba, sin que sean menos 3 puntos de prueba incluyendo los valores Min' y Max' y la diferencia entre dos cargas de prueba consecutivas no debe ser mayor que $0,15Max$.

Es necesario que las cargas de prueba estén compuestas de pesas patrones apropiadas o cargas de sustitución según 4.3.3.

Antes de iniciar la prueba, se ajusta a cero la indicación. Las cargas de prueba L_{Tj} normalmente se aplican de alguna de las siguientes maneras:

1. ascendiendo por pasos con descargas entre pasos – para la mayoría de los usos de los instrumentos para pesar cargas individuales,
2. ascendiendo continuamente por pasos – es similar a 1; puede incluir los efectos de deriva en los resultados, y reduce la cantidad de cargas a colocar y retirar del receptor de carga en comparación con 1,
3. ascendiendo y luego descendiendo por pasos de manera continua – procedimiento especificado en [3] para pruebas de verificación, mismo

⁴ Ejemplos de valores objetivos:

$k_L = 5$: cero o Min ; $0,25 Max$; $0,5 Max$; $0,75 Max$; Max . Las cargas de prueba pueden variar del valor objetivo hasta $0,1 Max$, ofreciendo una diferencia entre cargas de prueba consecutivas de al menos $0,2Max$.

$k_L = 11$: cero o Min , 10 puntos de $0,1 Max$ hasta Max . Las cargas de prueba pueden variar del valor objetivo hasta $0,05 Max$, ofreciendo una diferencia entre cargas de prueba consecutivas de al menos $0,08 Max$.

-
- comentario que en 2,
4. descendiendo de manera continua por pasos desde Max - simula el uso de funcionamiento de una tolva, los mismos comentarios que en 2.

Con instrumentos multi-intervalos - vea [3], los métodos antes indicados pueden modificarse para pasos de carga menores que Max aplicando cargas de tara ascendentes o descendentes usando la función tara de la balanza y aplicando una carga de valor de masa cercano pero no mayor a Max_1 para obtener indicaciones con d_1 .

Se pueden realizar pruebas adicionales para evaluar el comportamiento del instrumento en condiciones especiales, por Ej. evaluar la indicación después de una operación de tara, o la variación de la indicación cuando el instrumento se somete a una carga constante durante un tiempo especificado, etc.

La prueba, o cargas individuales, pueden ser repetidas para combinar la prueba con la prueba de repetibilidad de 5.1.

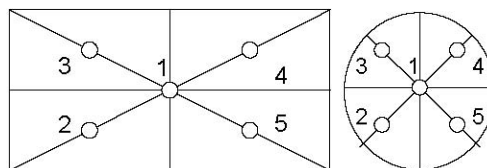
Se deben registrar las indicaciones I_{L_j} para cada carga. Después de retirar que cada una carga, se debe comprobar que la indicación sin carga sea cero y en caso contrario debe ajustarse a cero si no es así, registrando la indicación sin carga I_{0_j} como se indica en 4.4.1.

5.3 Prueba de excentricidad

La prueba consiste en poner una carga de prueba L_{ecc} en diferentes posiciones del receptor de carga, de tal manera que el centro de gravedad de la carga ocupe, tanto como sea posible, las posiciones que se encuentran indicadas en la Figura 5.3-1 o en posiciones similares.

Figura. 5.3-1 Posiciones de carga para la prueba de excentricidad

1. Centro
2. Frontal izquierdo
3. Posterior izquierdo
4. Posterior derecho
5. Frontal derecho



La carga de prueba L_{ecc} debe ser al menos de $Max/3$, o al menos $Min' + (Max' - Min')/3$ para un intervalo de pesada reducido. Se deben considerar las recomendaciones del fabricante si están disponibles y las limitaciones obvias del instrumento, por Ej. vea la OIML R 76-1 [3] para básculas de alto alcance (camioneras).

La carga de prueba no requiere ser calibrada ni verificada a menos que los resultados sirvan para la determinación de los errores de indicación conforme a 5.2.

Antes de la prueba la indicación se ajuste a cero. La carga de prueba se coloca primero en la posición 1, y después se mueve a las otras 4 posiciones en orden arbitrario. Al final se puede colocar nuevamente en la posición 1.

Se deben registrar las Indicaciones I_{Li} para cada posición de la carga. Después de retirar cada carga se debe revisar la indicación regresa a cero y puede, si resulta apropiado ajustarse a cero, registrando la indicación del instrumento sin carga I_{0j} como se indica en 4.4.1.

5.4 Mediciones auxiliares

Cuando se quiere llevar a cabo la calibración con la menor incertidumbre posible se recomiendan las siguientes mediciones y los registros siguientes.

Para considerar los efectos del empuje del aire – como se indica en 4.2.2:

Se debe medir la temperatura del aire en la vecindad del instrumento por lo menos una vez durante la calibración. Cuando el instrumento se utiliza en un ambiente controlado, se debe registrar variación de temperatura observada, por Ej. en una gráfica de temperatura, de los ajustes del dispositivo de control, etc.

La presión barométrica o, en su defecto, la altura sobre el nivel del mar del lugar puede ser útil.

Considerando los efectos de convección - como se indica en 4.2.3:

Se deben tomar precauciones para evitar que los efectos de convección sean excesivos, observando que la diferencia de temperatura entre las pesas y el instrumento no exceda de los valores límites, y/o registrar el tiempo de ambientación recomendable. Para comprobar la diferencia de temperatura es muy útil usar un termómetro junto a las pesas en el interior de su estuche.

Considerando los efectos por interacción magnética:

Los instrumentos con muy buena resolución es conveniente comprobar si la interacción magnética es apreciable. Se debe pesar una pesa patrón conjuntamente con un separador no metálico (por Ej. madera, plástico), el separador se coloca primero sobre la pesa y luego debajo de ella obteniendo las indicaciones correspondientes.

Si la diferencia entre las indicaciones es diferente de cero, esto puede considerarse como advertencia en el informe o certificado de calibración.

6. RESULTADOS DE LA MEDICIÓN

Las fórmulas de los capítulos 6 y 7 deberían servir como elementos de un esquema estándar para una evaluación equivalente de los resultados de las pruebas de calibración. Donde se apliquen sin cambios tanto como sea posible, no se requieren descripciones adicionales de la

evaluación.

No se pretende usar todas las fórmulas, símbolos y/o índices para la presentación de los resultados en el informe o certificado de calibración.

En esta sección se usa la definición de indicación I como se indica en 4.4.

6.1 Repetibilidad

De las n indicaciones I_{ji} para una carga de prueba dada L_{Tj} , la desviación estándar s_j se calcula

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

con

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

Cuando se haya aplicado solo una carga de prueba, el índice j puede omitirse.

6.2 Errores de indicación

6.2.1 Valores discretos

Para cada carga de prueba L_{Ti} , el error de indicación se calcula de la siguiente manera:

$$E_j = I_j - m_{refj} \quad (6.2-1a)$$

Cuando una indicación I_j es la media de más de una lectura, I_j será el valor medio calculado como en (6.1-2).

m_{ref} es la masa de referencia o “valor verdadero” de la carga. – como se indica en 4.3.1, 4.3.3.

La masa de referencia es

o el valor nominal de la carga m_N ,

$$m_{refj} = m_{Nj} \quad (6.2-2)$$

o su valor de masa convencional m_c

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

Cuando la carga de prueba este conformada por más de una pesa, m_{Nj} en la fórmula anterior

se sustituye $(\sum m_N)_j$ y δm_{cj} por $(\sum \delta m_c)_j$.

Cuando se indique un error y/o una indicación en una lista o se use además en relación a con la carga de prueba, éstas deben presentarse siempre en relación con el valor nominal m_N de la carga, incluso si se usa el valor de masa real de la carga de prueba. En este caso el error se mantiene invariable cuando la indicación se modifica por:

$$I(m_N) = I'(m_c) - \delta m_c \quad (6.2-4)$$

Siendo I' la indicación (provisional) determinada al aplicar m_c .

(6.2-1a) entonces toma la forma de

$$E_j = I_j - m_{Nj} = (I'_j - \delta m_{cj}) - m_{Nj} \quad (6.2-1b)$$

6.2.2 Curva característica del alcance de pesada

Adicional a los valores discretos I_j , E_j o de manera alternativa, se puede determinar una curva característica, o de calibración, para el intervalo de pesada que permite estimar el error de indicación para cualquier indicación I dentro del intervalo de pesada.

Se puede obtener la función:

$$E_{appr} = f(I) \quad (6.2-5)$$

mediante una aproximación apropiada generalmente una aproximación por el método de “mínimos cuadrados”:

$$\sum v_j^2 = \sum (f(I_j) - E_j)^2 = \text{mínimo} \quad (6.2-6)$$

donde

v_j = residuos

f = función de aproximación

La aproximación también debe considerar las incertidumbres de los errores $u(E_j)$, utilizar un modelo de la función que refleje las propiedades físicas del instrumento, por Ej. la forma en que se relacionan la carga y su indicación $I = g(L)$, incluir una comprobación sobre si los parámetros encontrados para la función modelo son matemáticamente consistentes o no con los datos reales.

Se supone que para cualquier m_{Nj} el error E_j permanece igual si la indicación real I_j se sustituye reemplaza por su valor nominal I_{Nj} . Los cálculos para evaluar (6.2-6) se pueden realizar por tanto con los datos m_{Nj} , E_j , o I_{Nj} , E_j .

En el apéndice C se dan recomendaciones acerca de la selección de una fórmula de aproximación adecuada y los cálculos necesarios.

6.3 Efecto de carga excéntrica

De las indicaciones I_i obtenidas en diferentes posiciones de la carga como indica 5.3, se calculan las diferencias ΔI_{ecc}

$$\Delta I_{ecc} = I_i - I_1 \quad (6.3-1)$$

Cuando la carga de prueba esté conformada por pesas patrones, se deben calcular los errores de la siguiente manera:

$$E_{ecc} = I_i - m_N \quad (6.3-2)$$

7. INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN

En esta sección y en las siguientes se encuentran términos de incertidumbre de medición asignados a pequeñas correcciones, los cuales son proporcionales a valores específicos de masa o una indicación específica. Para el cociente de una incertidumbre dividida por el valor de masa o la indicación relacionada, se usará la notación abreviada \hat{w} .

Ejemplo: sea

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

Si el término $u(corr)$ es adimensional, entonces

$$\hat{w}(m_{corr}) = u(corr) \quad (7-2)$$

Por lo anterior, la variancia relativa se representa por $\hat{w}^2(m_{corr})$ y la incertidumbre expandida relativa por $\hat{W}(m_{corr})$.

7.1 Incertidumbre estándar para valores discretos

La fórmula básica para la calibración es

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

con las varianzas

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

Cuando se emplean cargas de sustitución – vea 4.3.3 - m_{ref} es reemplazado por L_{Tn} en ambas expresiones.

Los términos se desarrollan a continuación.

7.1.1 Incertidumbre estándar de la indicación

Para considerar las fuentes de variabilidad de la indicación, (4.4.1-1) se complementa con los términos de corrección δI_{xx} como se muestra a continuación:

$$I = I_L + \delta I_{digL} + \delta I_{rep} + \delta I_{ecc} - I_0 - \delta I_{dig0} \quad (7.1.1-1)$$

Todas esas correcciones tienen valor cero como valor esperado. Sus incertidumbres estándares son:

7.1.1.1 δI_{dig0} considera al error de redondeo de la indicación sin carga. Los límites son $\pm d_0/2$ o $\pm d_T/2$ según aplique; se asume una distribución rectangular, por lo tanto

$$u(\delta I_{dig0}) = d_0 / (2\sqrt{3}) \quad (7.1.1-2a)$$

o

$$u(\delta I_{dig0}) = d_T / (2\sqrt{3}) \quad (7.1.1-2b)$$

respectivamente.

Nota 1: consulte 4.4.2 para el significado de d_T

Nota 2: Para un instrumento con aprobación de modelo según la OIML R 76-1 [3], el error de redondeo de la indicación cero después de ajustar a cero o balancear la tara esta limitado por $\pm d_0/4$, de modo que:

$$u(\delta I_{dig0}) = d_0 / (4\sqrt{3}) \quad (7.1.1-2c)$$

7.1.1.2 δI_{digL} considera al error de redondeo de la indicación con carga. Los límites son $\pm d_I/2$ o $\pm d_T/2$ según aplique; se asume una distribución de probabilidad rectangular, por lo tanto

$$u(\delta I_{digL}) = d_I / 2\sqrt{3} \quad (7.1.1-3a)$$

o

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

Nota: con un instrumento multi-intervalo d_I varía con I !

7.1.1.3 δI_{rep} considera al error debido a la imperfecta repetibilidad; se asume una distribución de probabilidad normal, estimada de la siguiente manera,

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

con $s(I_j)$ acorde a 6.1.

Sí una indicación I_j es el promedio de n lecturas, la incertidumbre estándar correspondiente es

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

Cuando únicamente se ha realizado una prueba de repetibilidad, esta desviación estándar podría ser considerada como representativa para todas las indicaciones del instrumento en el intervalo de pesada considerado.

Cuando se determinan varias s_j ($s_j = s(I_j)$ en notación abreviada) con diferentes cargas de prueba, debe usarse el mayor de los valores de s_j de los dos puntos de prueba.

Si se pudiera establecer que los valores de s_j determinados para diferentes cargas de prueba L_{Tj} , tienen una relación funcional con la carga, esta misma función debe aplicarse para combinar los valores de s_j en una desviación estándar agrupada “ s_{pool} ”.

Ejemplos para tales funciones son

$$s_j = \text{constante} \quad (7.1.1-7)$$

$$s_j^2 = s_0^2 + s_r^2 (L_{Tj} / \text{Max})^2 \quad (7.1.1-8)$$

Los componentes s_0^2 y s_r^2 deben ser determinados o por una curva o por cálculo.

Nota: Cuando se declara la desviación estándar en un informe o certificado de calibración, debe especificarse si se trata del resultado de una sola prueba o el promedio de n resultados.

7.1.1.4 δI_{ecc} considera el error debido a la a la posición excéntrica del centro de gravedad de la carga de prueba. Este efecto puede ocurrir cuando la carga de prueba se conforma con más de un cuerpo una pieza. Cuando este efecto no se pueda despreciar este efecto, se debe estimar su magnitud basándose en una de las suposiciones siguientes:

las diferencias determinadas por (6.3-1) son proporcionales a la distancia de la carga desde el centro del receptor de carga y al valor de la carga;
la excentricidad del centro de gravedad efectivo de la carga de prueba no es mas que 1/2 del valor de la prueba de excentricidad.

Mientras pudiera haber instrumentos en los cuales el efecto de carga excéntrica es aún mayor en ángulos diferentes a los que han sido aplicadas las cargas, basado en la mayor diferencia determinada según 6.3, el efecto se estima como

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

Se asume una distribución de probabilidad rectangular, por lo tanto la incertidumbre estándar es,

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

o en notación relativa,

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

7.1.1.5 La incertidumbre estándar de la indicación normalmente se obtiene por

$$u^2(I) = d_0^2/12 + d_1^2/12 + s^2(I) + \hat{w}^2(I)I^2 \quad (7.1.1-12)$$

Nota 1: la incertidumbre $u(I)$ es = constante sólo si $s =$ es constante y no hay que considerar efectos de excentricidad.

Nota 2: los dos primeros términos de la derecha pueden ser modificados especialmente en los casos mencionados en 7.1.1.1 y 7.1.1.2.

7.1.2 Incertidumbre estándar de la masa de referencia

De 4.2.4 y 4.3.1 el valor de la masa de referencia es:

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

El último término en el lado derecho representa correcciones adicionales que, en ocasiones especiales, puede ser necesario aplicar, pero en lo sucesivo no serán considerados.

Las correcciones y sus incertidumbres estándares son:

7.1.2.1 δm_c es la corrección a m_N para obtener el valor de masa convencional m_c ; esta se obtiene del informe o certificado de calibración para las pesas patrones, en conjunto con la incertidumbre de calibración U y el factor de cobertura k . La incertidumbre estándar es

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

Cuando las pesas patrones ha sido calibradas teniendo en cuenta las tolerancias específicas Tol , por Ej. los errores máximos tolerados mpe especificados en la Recomendación OIML R 111-1, y se usan considerando solo sus valores nominales m_N como valores de masa, es decir $\delta m_c = 0$, se debe asumir una distribución rectangular, de manera que:

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

Si la carga de prueba esta compuesta de más de una pesa patrón, las incertidumbres estándares se suman aritméticamente, no por suma de cuadrados, considerando las correlaciones asumidas entre las pesas patrón.

Para cargas de prueba parcialmente hechas de cargas de sustitución vea 7.1.2.6

Nota 1: consulte 6.2.1 para el uso de m_c o m_N .

Nota 2: Cuando se establece la conformidad de las pesas patrones con la OIML R 111-1, se puede modificar (7.1.2-3) sustituyendo Tol por mpe . Para pesas con $m_N \geq 0,1$ kg el cociente mpe / m_N es constante para todas las pesas pertenecientes a una misma clase de exactitud, $mpe = c_{class} m_N$ con c_{class} según la tabla 7.1-1

entonces, puede usarse (7.1.2-3) de la forma

$$u(\delta m_c) = m_N c_{class} / \sqrt{3} \quad (7.1.2-3a)$$

o como incertidumbre estándar relativa

$$\hat{w}(\delta m_c) = c_{class} / \sqrt{3} \quad (7.1.2-3b)$$

Tabla 7.1-1 Cociente $c_{class} = mpe/m_N$ para pesas patrones con $m_N \geq 100$ g según OIML R 111-1 [4]

Clase	$c_{class} \times 10^6$
E ₁	0,5
E ₂	1,5
F ₁	5
F ₂	15
M ₁	50
M ₂	150
M ₃	500

7.1.2.2 δm_B es la corrección por empuje de aire introducida en 4.2.4. Su valor depende de la densidad ρ de la pesa de calibración, del intervalo de densidades del aire ρ_a asumidas y del ajuste del instrumento – vea los casos A y B en 4.2.4.

Caso A:

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

con la incertidumbre estándar relativa obtenida de

$$\hat{w}^2(m_B) = u^2(\rho_a) (1/\rho - 1/\rho_c)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho) / \rho^4 \quad (7.1.2-5)$$

Caso B1:

$$\delta m_B = -m_{cCal} [(\rho_a - \rho_0)(1/\rho - 1/\rho_c) + \delta\rho_{as}/\rho_c] \quad (7.1.2-6)$$

con la incertidumbre estándar relativa obtenida de

$$\hat{w}^2(m_B) = u^2(\rho_a)(1/\rho - 1/\rho_c)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho)/\rho^4 + u^2(\delta\rho_{as})/\rho_c^2 \quad (7.1.2-7)$$

Caso B2:

$$\delta m_B = -m_N(\rho_a - \rho_0)/\rho \quad (7.1.2-8)$$

con la incertidumbre estándar relativa obtenida de

$$\hat{w}^2(m_B) = u^2(\rho_a)/\rho^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho)/\rho^4 \quad (7.1.2-9)$$

Siempre que se conozcan los valores de ρ , $u(\rho)$, ρ_a y $u(\rho_a)$, estos valores deben usarse para determinar $\hat{w}(m_B)$.

Si no se cuenta con la información anterior, la densidad ρ y su incertidumbre estándar pueden estimarse usando el sentido común. En el apéndice E₁ se dan los valores reconocidos internacionalmente para los materiales más comúnmente utilizados para la fabricación de pesas patrones.

La densidad de aire ρ_a y su incertidumbre estándar pueden calcularse a partir de la temperatura y la presión atmosférica (siendo la humedad relativa, de menor influencia), o pueden estimarse a partir de la altitud sobre el nivel de mar.

Para las diferencias $\delta\rho_{as}$ (Caso B1), se debe asumir el valor cero con una incertidumbre apropiada $u(\delta\rho_{as})$ para la cual debe estimarse un límite $\Delta\rho_{as}$ considerando la variabilidad de la presión atmosférica y la temperatura en el lugar durante un período mayor de tiempo.

Una solución sencilla puede ser considerar los mismos estimados para ρ_a y ρ_{as} y la misma incertidumbre para ambos valores.

En el apéndice A se dan varias fórmulas e información sobre las varianzas esperadas.

En el apéndice E se dan valores de $\hat{w}(m_B)$ para algunas combinaciones de valores de ρ y ρ_a . Para las calibraciones del caso A, los valores son en su mayoría despreciables.

Para calibraciones del caso B, podría recomendarse para la mayoría de los casos no aplicar una corrección δm_B , pero calcular la incertidumbre en base a ρ y a $\rho_a = \rho_0 \pm \Delta\rho_a$.

Cuando las pesas patrones son conformes con la OIML R 111-1 [4], y no se tiene

información sobre ρ y ρ_a , se puede recurrir a la sección 7 de la OIML R 111-1⁵. No se aplica corrección alguna y las incertidumbres relativas son:

para el caso A son,

$$\hat{w}(m_B) \approx mpe / (4m_N \sqrt{3}) \quad (7.1.2-5a)$$

para los casos B1 y B2,

$$\hat{w}(m_B) \approx (0,1\rho_0 / \rho_c + mpe / (4m_N)) / \sqrt{3} \quad (7.1.2-9a)$$

Del requerimiento de la nota al pie 5, estos límites se pueden obtener para ρ :

para clase E₂: $|\rho - \rho_c| \leq 200 \text{ kg/m}^3$, y para clase F₁: $|\rho - \rho_c| \leq 600 \text{ kg/m}^3$.

Nota: Debido a que la densidad de materiales utilizados para las pesas patrones normalmente está más cerca a ρ_c que lo permitido por los límites de la OIML R 111, las últimas dos fórmulas se pueden considerar como límites superiores para $\hat{w}(m_B)$. Si una comparación simple de estos valores con la resolución del instrumento ($1/n_M = d/Max$) demuestra que son lo suficiente pequeños, un cálculo más elaborado de esta componente de incertidumbre basado en los datos correspondientes puede resultar redundante.

7.1.2.3 δm_D es la corrección debida a la posible deriva de la m_c de la pesa desde la última calibración hasta el momento en que usa. Lo mas conveniente es asumir un valor límite D basándose en la diferencia en m_c evidenciada a partir de los informes o certificados de calibración consecutivos de la pesa patrón.

Si no esta disponible tal información, D puede estimarse como un múltiplo de su incertidumbre expandida $U(m_c)$ teniendo en cuenta la calidad de la pesa, la frecuencia y el cuidado en su uso:

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

donde k_D puede elegirse como un valor entre 1 a 3.

No es recomendable aplicar una corrección, pero si asumir una distribución simétrica con límites $\pm D$ (distribución rectangular). La incertidumbre es entonces

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

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

⁵ La densidad del material usado para pesas debe ser tal que una desviación del 10 % de la densidad del aire especificada (1.2 kg/m³) no resulte en un error excedente a un cuarto del error máximo permitido.

$$\hat{w}(m_D) = D_{rel} / \sqrt{3} = k_D \hat{W}(m_N) / \sqrt{3} \quad (7.1.2-12)$$

Para pesas en conformidad con la OIML R 111-1 [4], la estimación puede ser $D \leq mpe$, o $D_{rel} \leq c_{class}$ – ver Tabla 7.1-1

7.1.2.4 δm_{conv} es una corrección para efectos de convección según 4.2.3. Un valor límite Δm_{conv} se puede tomar del Apéndice F, dependiendo de una diferencia conocida en temperatura ΔT y de la masa de la pesa patrón.

No es recomendable aplicar una corrección pero si asumir una distribución simétrica con límites $\pm \Delta m_{conv}$. La incertidumbre estándar es

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

7.1.2.5 La incertidumbre estándar de la masa de referencia se obtiene de – vea 7.1.2

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

con las contribuciones de 7.1.2.1 a 7.1.2.4.

Como ejemplo los términos están especificados para una calibración del caso A con pesas patrones de $m_N \geq 0,1$ kg conforme a OIML R 111-1, usadas con sus valores nominales:

$$\hat{w}^2(m_{ref}) = c_{class}^2 / 3 + c_{class}^2 / 48 + c_{class}^2 / 3 + (\Delta m_{conv} / m_N)^2 / 3 \quad (7.1.2-14a)$$

7.1.2.6 Si una carga de prueba esta compuesta parcialmente por cargas de sustitución según 4.3.3, la incertidumbre estándar para la suma $L_{Tn} = nm_{c1} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \dots + \Delta I_{n-1}$ está dada por la expresión siguiente:

$$u^2(L_{Tn}) = n^2 u^2(m_{c1}) + 2[u^2(I_1) + u^2(I_2) + \dots + u^2(I_{n-1})] \quad (7.1.2-15)$$

donde $u(m_{c1}) = u(m_{ref})$ de 7.1.2.5, y $u(I_j)$ de 7.1.1.5 para $I = I(L_{Tj})$

Nota: las incertidumbres $u(I_j)$ tienen que incluirse también para indicaciones con cargas de sustitución ajustadas, de modo que el ΔI correspondiente resulte en cero!

Dependiendo del tipo de carga de sustitución, puede ser necesario añadir contribuciones de incertidumbre adicionales:

para carga excéntrica según 7.1.1.4 a algunas o todas la indicaciones $I(L_{Tj})$;

para el empuje de aire sobre las cargas de sustitución, cuando son de materiales de baja

densidad (por Ej. arena, grava) y la densidad del aire varia significativamente durante el tiempo en que se usan.

Cuando $u(I_j)$ = es constante, la expresión se simplifica a

$$u^2(L_{Tn}) = n^2 u^2(m_{c1}) + 2[(n-1)u^2(I)] \quad (7.1.2-16)$$

7.1.3 Incertidumbre estándar del error

La incertidumbre estándar del error es calculado de la siguiente manera, con los términos de 7.1.1 y 7.1.2, tanto como sea apropiado,

$$u^2(E) = d_0^2/12 + d_I^2/12 + s^2(I) + u^2(\delta I_{ecc}) \\ + u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D) + u^2(\delta m_{conv}) \quad (7.1.3-1a)$$

o, si se aplican incertidumbres relativas, de

$$u^2(E) = d_0^2/12 + d_I^2/12 + s^2(I) + \hat{w}^2(I_{ecc})I^2 \\ + \{\hat{w}^2(m_c) + \hat{w}^2(m_B) + \hat{w}^2(m_D)\}m_{ref}^2 + u^2(\delta m_{conv}) \quad (7.1.3-1b)$$

Todas las magnitudes de entrada se consideran sin correlación, por lo tanto no se consideran covarianzas.

El índice “*j*” ha sido omitido. Cuando los últimos términos de (7.1.3-1a, b) son pequeños comparados con los primeros tres términos, las incertidumbres de todos los errores determinados sobre todo el alcance de pesada deberían ser muy similares. Si no es así, la incertidumbre se tiene que calcular individualmente para cada indicación.

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

Los términos de (7.1.3-1a, b) pueden entonces ser agrupados en una fórmula simple que refleja mejor el hecho de que algunos de los términos son de naturaleza absolutos mientras que otros son proporcionales a la indicación:

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

Cuando (7.1.1-7) o (7.1.1-8) aplica a la desviación estándar determinada para el instrumento calibrado, los términos correspondientes deberán ser incluidos en (7.1.3-2).

7.2 Incertidumbre estándar para una curva característica

Cuando se realiza una aproximación para obtener una fórmula $E = f(I)$ para todo el intervalo de pesar como en 6.2.2, la incertidumbre estándar del error como en 7.1.3 tiene que modificarse para ser consistente con el método de aproximación. En dependencia de la función modelo, esto puede ser:

una sola varianza u^2_{appr} que se añade a (7.1.3-1), o

un conjunto de varianzas y covarianzas las cuales incluyan las varianzas en (7.1.3-1).

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

Para el ajuste de las curvas, se propone la aproximación por $\min \chi^2$, que es similar a la aproximación de mínimos cuadrados. Se ofrecen detalles en el Apéndice C.

7.3 Incertidumbre expandida de la calibración

La incertidumbre expandida del error es

$$U(E) = ku(E) \quad (7.3-1)$$

El factor de cobertura k , se debe elegir tal que la incertidumbre expandida corresponda a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95 %.

El valor $k = 2$, que corresponde a una probabilidad del 95,5 %, aplica cuando

- a) se puede asumir una distribución normal (Gaussiana) para el error de la indicación, y
- b) la incertidumbre estándar $u(E)$ es suficientemente confiable (por Ej. tiene un número suficiente de grados de libertad).

En el apéndice B2 se ofrece información adicional a estas condiciones, y el Apéndice B3 consejos de como determinar el factor k cuando uno o ambos no se cumplen.

Es aceptable determinar sólo un valor de k , para el “peor caso” situación que se identifica por experiencia, la cual se puede aplicar a las incertidumbres estándares de todos los errores para el mismo alcance de pesada.

7.4 Incertidumbre estándar del resultado de una pesada

El usuario debe saber que durante el uso de un instrumento calibrado la situación pudiera ser diferente a la de la calibración, en los aspectos siguientes:

1. las indicaciones que se obtienen cuando se usa el instrumento no son las mismas que las que se obtuvieron durante la calibración,
2. el proceso de pesada pudiera ser diferente del proceso de calibración en lo siguiente:
 - a. se toma una sola lectura para cada carga, en lugar de varias lecturas un promedio,

-
- b. se toma la lectura apreciando hasta la división de escala del instrumento d , no con mejor resolución,
 - c. se carga de manera ascendente y descendente, no sólo ascendente – o al revés,
 - d. se mantiene la carga en el receptor de carga más tiempo, no se descarga después de cada paso de carga – o al revés,
 - e. se aplica la carga de manera excéntrica,
 - f. se utiliza el dispositivo de equilibrio de “tara” (ajuste a cero), etc.
- 3. el ambiente puede ser diferente (temperatura, presión barométrica, etc.),
 - 4. con instrumentos que no se ajustan regularmente, por Ej. mediante el uso de un dispositivo interno, el ajuste puede cambiar por envejecimiento o por desgaste.

En oposición a los puntos del 1 al 3, este efecto depende normalmente del tiempo que haya pasado desde la calibración, esto debería ser considerado en relación a un cierto período de tiempo, por Ej., un año o el intervalo normal entre calibraciones.

Para distinguir entre las indicaciones I obtenidas durante la calibración de un instrumento y los resultados de las pesadas obtenidos en el mismo instrumento calibrado para una carga L se presentan los siguientes términos y símbolos:

- R = lectura, cualquier indicación obtenida después de la calibración;
- W = resultado de la pesada, lectura corregida para el error E .
- W = resultado de la pesada, lectura corregida teniendo en cuenta el error E .

R se interpreta como cualquier lectura con una resolución normal (múltiplo de d) aplicando las correcciones como corresponda.

Para una lectura realizada bajo las mismas condiciones que en la calibración, y con la carga bien centrada en el receptor de carga, sólo deben aplicarse las correcciones consideradas en 2a y 2b de este apartado. El resultado puede ser denominado: resultado de pesada bajo las condiciones de la calibración W^* :

$$W^* = R + \delta R_{digL} + \delta R_{rep} - (R_0 + \delta R_{dig0}) - E \quad (7.4-1a)$$

con la incertidumbre asociada

$$u(W^*) = \sqrt{\{u^2(E) + u^2(\delta R_{dig0}) + u^2(\delta R_{digL}) + u^2(\delta R_{rep})\}} \quad (7.4-2a)$$

W^* y $u(W^*)$ pueden ser calculados usando directamente usando la información, y los resultados de la calibración declarados en el informe o certificado de calibración:

los datos son: I_{cal} , E_{cal} , $U(E_{cal})$, y/o

la curva característica $E(R) = f(I)$ y $U(E(R)) = g(I)$.

Eso se realiza en 7.4.1. y 7.4.2.

Para considerar otras posibles influencias sobre los resultados de la pesada, se añaden correcciones adicionales llegando a la forma general del resultado de pesada:

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

con la incertidumbre asociada

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

Los términos añadidos y sus incertidumbres estándares se discuten en 7.4.3 y 7.4.4. Las incertidumbres estándares $u(W^*)$ y $u(W)$ se presentan 7.4.5.

Las secciones 7.4.3 y 7.4.4, y la información sobre $u(W)$ y $U(W)$ en las secciones 7.4.5 y 7.5, tienen el objetivo de asesorar al usuario del instrumento sobre la manera de estimar la incertidumbre de los resultados de pesada obtenidos bajo las condiciones normales de uso. No están concebidas de manera exhaustiva ni obligatorias.

Cuando un laboratorio de calibración ofrece esos estimados a sus clientes, partiendo de una información no medida por el laboratorio, los estimados estas estimaciones no deben declararse en el informe o certificado de calibración.

7.4.1 Incertidumbre estándar de una lectura en uso

Para considerar las fuentes de variabilidad de la lectura se aplica (7.1.1-1) sustituyendo I por R :

$$R = R_L + \delta R_{digL} + \delta R_{rep} - (R_0 + \delta R_{dig0}) \dots \{ + \delta R_{ecc} \} \quad (7.4.1-1)$$

El término en $\{ \}$ se añadirá cuando sea necesario

Las correcciones y sus incertidumbres estándares son:

7.4.1.1 δR_{dig0} considera al error de redondeo de la lectura del instrumento sin carga. Aplica 7.1.1.1 excepto cuando $d_T < d$, en este caso excluido, de modo que:

$$u(\delta R_{dig0}) = d_0 / \sqrt{12} \quad (7.4.1-2)$$

Aplica la nota 2 en 7.1.1.1

7.4.1.2 δR_{digL} considera al error de redondeo de la lectura con carga. Aplica 7.1.1.2 excepto cuando $d_T < d_L$ en este caso excluido, de modo que:

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

7.4.1.3 δR_{rep} considera al error por repetibilidad. Aplica 7.1.3.1, la desviación estándar s o $s(I)$ para una sola lectura, se toma del informe o certificado de calibración, de modo que:

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

Nota: En el informe o certificado de calibración, se puede declarar la desviación estándar para una sola indicación o para el promedio de n indicaciones. En este último caso hay que multiplicar el valor de s por \sqrt{n} para obtener la desviación estándar de una sola lectura.

7.4.1.4 δR_{ecc} considera al error de excentricidad. Esta corrección se coloca entre paréntesis porque generalmente es importante para W , no para W^* , de todos modos la corrección se considera en 7.4.4.3.

7.4.1.5 La incertidumbre estándar de la lectura se obtiene por

$$u^2(R) = d_0^2/12 + d_R^2/12 + s^2(R) \cdot \{ + \hat{w}^2(R_{ecc})R^2 \} \quad (7.4.1-5)$$

el término en $\{ \}$ se añadirá cuando sea necesario,

Nota: la incertidumbre $u(R)$ es = constante si $s =$ es constante; En los casos excepcionales en que haya que considerar el error de excentricidad, el término se debe tomar de 7.4.4.4.

7.4.2 Incertidumbre del error de una lectura

Para las lecturas R que coincidan a las indicaciones I_{calj} declaradas en el informe o certificado de calibración, se deben tomar los valores de $u(E_{calj})$ declarados en el informe o certificado. Para las lecturas que no coincidan, los valores $u(E(R))$ se pueden calcularse usando (7.1.3-2) siempre que se conozcan si α y β o se determinen mediante una interpolación o una fórmula de aproximación como la que se indica en 7.2.

Para las indicaciones I_j cercanas a las lecturas reales R , las incertidumbres $u(E(R))$ generalmente son mayores que $u(E_{calj})$, a menos que haya determinado mediante una fórmula de aproximación.

Nota: En el informe o certificado de calibración generalmente se declara $U_{95}(E_{cal})$ de

modo que $u(E_{cal})$ debe obtenerse considerando el factor de cobertura k declarado en el propio informe o certificado.

7.4.3 Incertidumbre debido a influencias ambientales

El término de corrección δR_{instr} considera hasta 3 efectos que se discuten continuación. Estos efectos generalmente no se tienen en cuenta cuando los instrumentos se ajustan correctamente antes del uso - como se indica en 4.2.4, caso A. En cualquier otro caso, si deben tenerse en cuenta siempre que apliquen. En la práctica, la corrección es cero y las incertidumbres correspondientes se estiman a partir del conocimiento del usuario sobre las propiedades del instrumento.

7.4.3.1 δR_{temp} considera el cambio en la curva característica (o el ajuste) del instrumento debido al cambio de la temperatura ambiente. Se puede estimar como un valor límite de $\delta R_{temp} = TK\Delta T$ cuyos términos son los siguientes:

Generalmente el fabricante da la especificación $TK = \partial(Max)/\partial T$, en muchos casos dada como $|TK| \leq |TC|$ en $10^{-6}/K$. Para instrumentos con aprobación de modelo bajo OIML R 76 [3], se asume que $|TC| \leq mpe(Max)/(Max\Delta T_{Appr})$ donde ΔT_{Appr} es el intervalo de temperatura del modelo aprobado, marcado en el instrumento; para otros instrumentos se debe asumir conservadoramente un múltiplo (de 3 a 10 veces) del valor correspondiente para los instrumentos con aprobación de modelo, o no dar ninguna información sobre el uso del instrumentos a temperaturas diferentes a la de calibración.

El intervalo de variación de la temperatura ΔT (intervalo completo) se debe estimar considerando el lugar donde se esta usando el instrumento, como se discute en el Apéndice A.2.2.

Se asume una distribución rectangular, así que la incertidumbre relativa es

$$\hat{w}(R_{temp}) = TC\Delta T / \sqrt{12} \quad (7.4.3-1)$$

7.4.3.2 δR_{bovy} considera el cambio en el ajuste del instrumento debido a la variación de la densidad del aire; el valor de la corrección es cero y la contribución de la incertidumbre se estima de acuerdo a 7.1.2.2, donde se espera una variabilidad de la densidad del aire mayor que durante la calibración.

Nota: la densidad de la pieza pesada ρ no se considera en esta contribución de incertidumbre, ya que este valor no fue considerado para el valor del resultado de la pesada W !.

7.4.3.3 δR_{adj} considera el cambio del ajuste en el instrumento desde el momento de la calibración debido al envejecimiento o el desgaste.

A partir de las calibraciones anteriores, cuando existan, se puede tomar como valor limite a

la mayor diferencia $|\Delta E(Max)|$ entre los errores cercanos a Max obtenidos en dos calibraciones consecutivas. De hecho, $\Delta E(Max)$ puede tomarse de la especificación del fabricante para el instrumento o se puede estimar como $\Delta E(Max) = mpe(Max)$ cuando el instrumento cuenta con aprobación de modelo según la OIML R 76-1 [3]. Cualquiera de esos valores puede ser considerado, en la práctica, considerando el tiempo transcurrido entre las calibraciones, asumiendo que debe crecer linealmente con el tiempo.

Se asume una distribución rectangular, así que la incertidumbre relativa es

$$\hat{w}(R_{adj}) = |\Delta E(Max)| / (Max \cdot \sqrt{3}) \quad (7.4.3-2)$$

7.4.3.4 La incertidumbre estándar relativa relacionada a los errores resultantes de los efectos ambientales son evaluados por

$$\hat{w}^2(R_{instr}) = \hat{w}^2(R_{temp}) + \hat{w}^2(R_{adj}) \quad (7.4.3-3)$$

7.4.4 Incertidumbre por la operación del instrumento

El término de corrección δR_{proc} considera a los errores adicionales que pueden ocurrir si el procedimiento de pesada es diferente al procedimiento de calibración. Las correcciones no se aplican pero las incertidumbres correspondientes se estiman basándose en el conocimiento del usuario acerca de las propiedades del instrumento.

7.4.4.1 δR_{Tare} considera el resultado neto de la pesada después de una operación de ajuste a cero [3]. El posible error y su incertidumbre correspondiente se debe estimar considerando la relación básica entre las lecturas involucradas:

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

donde los valores de R' son lecturas ficticias que se procesan dentro del instrumento mientras que la indicación visible R'_{Net} se obtiene directamente, después de ajustar la indicación del instrumento a cero con la carga tara en el receptor de carga. El resultado de la pesada en este caso es en teoría:

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

consistente con (7.3-1). Los errores para el peso *Bruto* y la *Tara* se pudieran tomar como los errores para los valores equivalentes de R conforme con lo anterior. Sin embargo el valor *Tara* – y consecuentemente el valor *Bruto* – no se registran normalmente.

El error podría ser estimado entonces como

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

Donde $E(Net)$ es el error para una lectura; $R =$ Neto con una corrección adicional debida

al efecto de no linealidad de la curva de error $E_{cal}(I)$. Para cuantificar la no linealidad se puede recurrir a la primera derivada de la función $E_{appr} = f(R)$, si se conoce la esta función o la pendiente q_E entre puntos de calibración consecutivos que se puede calcular por

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

El mayor valor y menor valor de la derivada o de los cocientes se toman como valores límites para la corrección $\delta R_{Tare} = q_E R_{Net}$, para la cuál se puede asumir una distribución rectangular. Esto resulta en la incertidumbre estándar relativa

$$\hat{w}(R_{Tare}) = (q_{E_{max}} - q_{E_{min}}) / \sqrt{12} \quad (7.4.4-5)$$

Para estimar la incertidumbre $u(W)$, se aplica (7.1-2) con $R = R_{Net}$. Para $u(E)$ se justifica asumir que $u(E(Net)) = u(E_{cal}(R = Net))$ debido a la completa correlación entre las magnitudes que contribuyen a las incertidumbres de los errores de las lecturas ficticias de peso *Bruto* y *Tara*.

7.4.4.2 δR_{time} considera los posibles efectos de deriva e histéresis en situaciones como las siguientes:

a) durante la calibración la carga fue aplicada en ascenso de manera continua, o de manera continua, en ascenso y descenso (método 2 ó 3 en 5.2), de modo que la carga permaneció sobre el receptor de carga durante cierto tiempo; lo cual es muy significativo cuando se ha aplicado el método de sustitución, especialmente en instrumentos de alta capacidad. Durante el uso la carga discreta que se va a pesar se coloca y permanece sobre el receptor de carga solo el tiempo necesario para obtener la lectura o una impresión, de modo que el error de indicación puede ser diferente del valor obtenido para la misma carga durante la calibración.

Cuando se realizan pruebas continuamente de manera creciente y decreciente, la mayor diferencia de los errores ΔE_j para cualquier carga de prueba m_j se puede tomar como el valor límite para este efecto, quedando una incertidumbre estándar relativa de

$$\hat{w}(R_{time}) = \Delta E_{j_{max}} / (m_j \sqrt{12}) \quad (7.4.4-6)$$

Cuando las pruebas fueron realizadas solo en ascenso, el error en regreso a cero E_0 , si este fue determinado, se puede usar para estimar la incertidumbre estándar relativa

$$\hat{w}(R_{time}) = E_0 / (Max \sqrt{3}) \quad (7.4.4-7)$$

En ausencia de tal información, se puede estimar el valor límite para instrumentos con aprobación de modelo bajo la OIML R 76-1 [3] como

$$\Delta E(R) = Rmpe(Max)/Max \quad (7.4.4-8)$$

Para instrumentos sin aprobación de modelo, se puede considerar un estimado conservador multiplicando el valor anterior por n ($n = 3$ hasta 10 veces).

La incertidumbre estándar relativa es

$$w(R_{time}) = mpe(Max)/(Max\sqrt{3}),_o = nmpe(Max)/(Max\sqrt{3}) \quad (7.4.4-9)$$

b) durante la calibración la carga fue aplicada sin descarga entre pasos, las cargas durante las pesadas permanecen en el receptor de carga por un período mayor. En ausencia de información adicional – por Ej. la observación del cambio de indicación con respecto al tiempo – se puede recurrir a (7.4.4-9) según corresponda.

c) durante la calibración la carga se realizó solo de manera ascendente, durante el uso se realizan pesadas de descarga. Esa situación se puede tratar como la inversa del funcionamiento del dispositivo de equilibrio de tara - vea 7.4.4.1 – combinado con punto b) anterior. Aplican (7.4.4-5) y (7.4.4-9).

Nota: En el caso de la pesada de una descarga, la lectura R debe tomarse como un valor positivo, aún cuando la indicación del instrumento para pesar sea negativa.

7.4.4.3 δR_{ecc} considera al error de excentricidad. Se aplica 7.1.1.4 con la modificación de que se debe considerar totalmente el efecto encontrado durante la calibración, tal que

$$w(R_{ecc}) = (\Delta I_{ecc,i})_{max} / (L_{ecc} \sqrt{3}) \quad (7.4.4-10)$$

7.4.4.4 cuando se pesan cuerpos en régimen dinámico, por Ej. animales vivos, se debe asumir que $u(\delta I_{rep})$ aumenta. Por eso debe usarse un objeto típico para determinar la desviación estándar s_{dyn} con 5 pesadas como mínimo, y en (7.4.1-5) $s(R)$ debe sustituirse por s_{dyn} .

7.4.5 Incertidumbre estándar de un resultado de pesada

La incertidumbre estándar del resultado de una pesada se calcula teniendo en cuenta los términos aplicables especificados de 7.4.1 a 7.4.4,

Para el resultado de pesada bajo condiciones de la calibración:

$$u^2(W^*) = d_0^2/12 + d_L^2/12 + s^2(R) + u^2(E) \quad (7.4.5-1a)$$

Para el resultado de pesada en general:

$$u^2(W) = \mathbf{u}^2(W^*) + \left[\hat{w}^2(R_{temp}) + \hat{w}^2(R_{adj}) + \hat{w}^2(R_{Tare}) + \hat{w}^2(R_{time}) + \hat{w}^2(R_{ecc}) \right] R^2 + \left[s_{dyn}^2 - s^2(R) \right] \quad (7.4.5-1b)$$

El término $\mathbf{u}^2(W^*)$ se ha puesto en negrita para indicar que aplica en cualquier caso, mientras los otros términos se deberían incluir cuando apliquen.

Las contribuciones a $u(W)$ pueden ser agrupadas en dos términos α_W^2 y β_W^2

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

α_W^2 es la suma cuadrática de todas las incertidumbres estándares absolutas y $\beta_W^2 =$ suma de cuadrática de todas la incertidumbres estándares relativas.

7.5 Incertidumbre expandida de un resultado de pesada

7.5.1 Errores considerados en la corrección

La fórmula completa para el resultado de una pesada, que es igual a la lectura corregida teniendo en cuenta el error determinado por calibración, es

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

o

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

según corresponda.

La incertidumbre expandida $U(W)$ debe determinarse como

$$U(W^*) = ku(W^*) \quad (7.5-2a)$$

o

$$U(W) = ku(W) \quad (7.5-2a)$$

con $u(W^*)$ o $u(W)$ tanto como sea aplicable de 7.4.5.

Para $U(W^*)$ el factor de cobertura k se debe determinarse conforme a 7.3.

Para $U(W)$ debido al gran número de términos que conforman $u(W)$, el factor de cobertura k será en la mayoría de los casos $k = 2$, incluso cuando la desviación estándar s se obtiene a partir de sólo algunas mediciones, y/o cuando fue declarado en el certificado de calibración $k_{cal} > 2$.

En caso de duda, k se debe determinarse según 7.3 para

$$u(W(R=0)) = \alpha_w, \text{ y para}$$

$$u(W(R=Max)) = \sqrt{\alpha_w^2 + \beta_w^2 Max^2}$$

7.5.2 Errores incluidos en la incertidumbre

El laboratorio de calibración y el cliente pueden la declaración de una “incertidumbre global” $U_{gl}(W)$ que incluya los errores de indicación de modo tal que no sea necesario aplicar correcciones a las lecturas en uso:

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

A menos de que los errores sean simétricos alrededor de cero, ellos forman una contribución a la incertidumbre de tipo unilateral, la cual se puede interpretar solo de manera aproximada. Por simplicidad y conveniencia, es mejor declarar la “incertidumbre global” usando una expresión para todo el intervalo de pesada, que declarar valores individuales para valores fijos del resultado de la pesada.

Sea $E(R)$ una función, o E^0 un valor representativo de para todos los errores declarados en el informe o certificado de calibración para todo el intervalo de pesada, entonces la combinación de las incertidumbres en uso puede en principio tomar las formas siguientes:

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

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

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

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

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

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

Considerando el formato para $u(W)$ en (7.4.5-2b), las fórmulas (7.5.2-2b) y (7.5.2-3b) pueden ser más convenientes que las versiones correspondientes a la letra “a”.

Para la generación de la fórmula $E(R)$ o el valor representativo de E^0 ver el Apéndice C.

Es importante asegurar que $U_{gl}(W)$ tenga una probabilidad de cobertura no menor del 95 % en todo el intervalo de pesada.

7.5.3 Otras maneras de calificación del instrumento

Un cliente puede solicitar al Laboratorio de calibración una declaración de conformidad con una especificación determinada, como $|W - R| \leq Tol$ siendo Tol la tolerancia aplicable. La

tolerancia puede ser especificada como “ $Tol = x\%$ de R ”, como o “ $Tol = nd$ ”, o algo similar.

La conformidad se debe declarar de manera consistente con la NMX-EC-17025-2006 y/o con la ISO/IEC 17025 bajo la condición de que

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

tanto para valores individuales de R o para cualquiera de los valores de todo el intervalo de pesada o una parte de el.

Dentro del mismo intervalo de pesada, se puede declarar la conformidad para diferentes partes del intervalo, con diferentes valores de Tol .

8. INFORME O CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Esta sección contiene las recomendaciones sobre la información que debe contener un informe o certificado de calibración. Las cuales son consistentes con los requerimientos de la NMX-EC-17025-2006, ISO 9001 o ISO/IEC 17025, los cuales tienen prioridad.

8.1 INFORMACIÓN GENERAL

- Identificación del Laboratorio de Calibración,
- Referencia a la acreditación (entidad de acreditación, número de la acreditación), identificación del certificado (número de calibración, fecha de expedición, número de páginas),
- Firma(s) de la(s) persona(s) autorizada(s).
- Identificación del cliente.
- Identificación del instrumento calibrado,
- Información del instrumento (fabricante, tipo de instrumento, Max , d , lugar de instalación).
- Advertencia para que el informe o certificado de calibración pueda ser reproducido solo de manera íntegra, a menos de que el laboratorio de calibración autorice lo contrario por escrito.

8.2 Información acerca del procedimiento de calibración

- Fecha de las mediciones,
- Lugar de calibración y lugar de instalación del instrumento, en caso de que estos sean diferentes,
- Condiciones ambientales y/o uso que pueda afectar a los resultados de la calibración.
- Información sobre el instrumento (ajustes realizados, cualquier anomalía en su funcionamiento, parámetros de la configuración del “*software*” que sean relevantes para la calibración, etc.).
- Referencia a, o descripción del procedimiento aplicado, en caso de que este no sea obvio en el certificado, por Ej. el tiempo de estabilización observado entre cargas y/o

lecturas.

- Acuerdos con el cliente por Ej. sobre el alcance de calibración limitado, especificaciones metrológicas para las cuales se ha declarado conformidad.
- Información acerca de la trazabilidad de los resultados de la medición.

8.3 Resultados de medición

- Indicaciones y/o los errores para las cargas aplicadas, o errores relacionados con las indicaciones – para valores discretos y/o una ecuación de aproximación,
- los detalles del procedimiento de carga si este es relevante para entender lo mencionado anteriormente,
- la(s) desviación(es) estándar(es) determinada(s), identificada(s) como relacionada(s) a una sola indicación o al promedio de varias indicaciones,
- la incertidumbre expandida de medición para los resultados declarados.
- Indicación del factor de cobertura k , con el comentario acerca de la probabilidad de cobertura, y la razón para $k \neq 2$ cuando aplique.
- Cuando las indicaciones no han sido determinadas a partir de las lecturas normales – lecturas individuales con la resolución normal del instrumento – debe advertirse que la incertidumbre declarada es menor que la que pudiera encontrarse con las lecturas normales.
- Para clientes con menor conocimiento (del tema), tanto como aplique, podrían ser útiles consejos acerca de:
 - la definición del error de indicación,
 - como corregir las lecturas en uso al restar los errores correspondientes,
 - como interpretar las indicaciones y/o los errores declarados con mas decimales que la división de escala d .
- Puede ser útil citar los valores de $U(W^*)$ para todos los errores individuales o para la función $E(R)$ resultado de la aproximación.

8.4 Información adicional

Se puede añadir al informe o certificado de calibración sin ser parte del mismo, información adicional sobre la incertidumbre de medición esperada en uso, incluyendo las condiciones bajo las cuales es aplicable.

Donde los errores sean considerados para la corrección, se puede utilizar la siguiente fórmula:

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

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

Cuando se incluyen errores en la “incertidumbre global”, se puede usar la siguiente fórmula:

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

Se debería incluir la declaración de que la incertidumbre expandida de los valores resultantes de la fórmula corresponde a un nivel de confianza aproximado del 95%.

Opcional:

Se debe incluir una declaración de conformidad con determinada especificación y un intervalo de validez cuando aplique.

Esta declaración podría ser de la forma

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

y ésta podría ser dada

adicionalmente a los resultados de medición, o como declaración independiente, con referencia a los resultados de medición declarados a ser retenidos en el laboratorio de Calibración.

La declaración puede ser acompañada por un comentario que indique que todos los resultados de medición más las incertidumbres expandidas correspondientes se encuentran dentro de los límites de especificación.

9. VALOR DE MASA O VALOR DE MASA CONVENCIONAL

La magnitud W es una estimación del valor de masa convencional m_c del objeto pesado⁶. Para ciertas aplicaciones puede ser necesario calcular el valor de masa m o un valor más exacto para m_c , a partir de W .

La densidad ρ o el volumen V del objeto, en conjunto con la estimación de su incertidumbre estándar, deben ser obtenidos de otras fuentes.

9.1 Valor de masa

La masa de un cuerpo es

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

Despreciando los términos de segundo orden así como los de orden mayor, la incertidumbre estándar relativa $\hat{w}(m)$ se obtiene de

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

Para ρ_a y $u(\rho_a)$ (densidad de aire) ver Apéndice A.

Si V y $u(V)$ se conocen en lugar de ρ y $u(\rho)$, ρ se puede aproximar por W/V y $\hat{w}(\rho)$ se puede reemplazar por $\hat{w}(V)$.

9.2 Valor de masa convencional

El valor de masa convencional de un cuerpo es

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

Despreciando los términos de segundo orden así como los de orden mayor, la incertidumbre estándar relativa $\hat{w}(m_c)$ se obtiene de

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

Aplican los mismos comentarios que en (9.1-2).

⁶ En la mayoría de los casos, especialmente cuando los resultados son utilizados para el comercio, el valor W es utilizado como resultado de la pesada.

10. REFERENCIAS

- [1] EURAMET/cg-18/v.01 *Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments*. July 2007, previously EA-10/18
- [2] *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*, first edition 1993, ISO (Geneva, Switzerland)
- [3] *OIML R 76-1: Non-automatic Weighing Instruments Part 1: Metrological and technical requirements - Tests*, edition 2006
- [4] *OIML R111-1, Weights of Classes E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} , M_3* , Edition 2004 (E)
- [5] 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.
- [6] M. Glaeser: *Change of the apparent mass of weights arising from temperature differences*
Metrologia 36 (1999), p. 183-197
- [7] *ISO 31 Quantities and Units (1993) Part 11: Mathematical Signs and Symbols for use in physical sciences and technology*
- [8] *VIM, International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*, 2nd edition 1994
- [9] *Determination of Mass – Part 1: Dissemination of the unit of mass*”, by R. Balhorn, D. Buer, M. Gläser and M. Kochsiek
PTB-Bericht MA-24, 2nd revised edition, Braunschweig, April 1992
- [10] *SIM Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments*. 2008

APÉNDICE A: SUGERENCIAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE AIRE

Nota: En el Apéndice A, los símbolos son T para temperatura en K, y t para temperatura en °C

A1 Fórmulas para la densidad de aire

La fórmula de mayor exactitud para determinar la densidad del aire en la mayoría de los casos, es la recomendada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) [5]. Para el objetivo de esta Guía, es suficiente el uso de fórmulas menos sofisticadas que arrojan resultados ligeramente menos exactos.

A1.1 Versión simplificada de la fórmula CIPM, versión exponencial de [4], sección E3

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

con

- ρ_a densidad de aire en kg/m³
- p presión barométrica en hPa
- h_r humedad relativa de aire en %
- t temperatura de aire en °C

La fórmula ofrece resultados con $u_{form} / \rho_a \leq 2 \times 10^{-4}$ bajo las siguientes condiciones ambientales (incertidumbres de medición de p , h_r , t no incluidas)

$$900 \text{ hPa} \leq p \leq 1100 \text{ hPa}$$

$$h_r \leq 80 \%$$

$$10 \text{ °C} \leq t \leq 30 \text{ °C}$$

A1.2 La versión simplificada de la fórmula CIPM, versión normal

Se puede citar esa expresión de [9]

$$\rho_a = \frac{0,348444p - h_r(0,00252t - 0,020582)}{273,15 + t} \quad (\text{A1.2-1})$$

con los símbolos anteriores.

La fórmula ofrece resultados con $\Delta\rho_{a,form} \leq 0,0005 \text{ kg/m}^3$ bajo las siguientes condiciones ambientales (no están incluidas las incertidumbres de medición de p , h_r , t):

$$p \quad 940 \text{ hPa} \leq p \leq 1080 \text{ hPa}$$

$$h_r \quad h_r \leq 80 \%$$

$$t \quad 20 \text{ °C} \leq t \leq 30 \text{ °C}$$

$\Delta\rho_{a,form}$ es la diferencia entre valores obtenidos de esta fórmula y los valores correspondientes de la fórmula CIPM. Por lo tanto, la fórmula de la incertidumbre estándar combinada relativa $\hat{w}(\rho_{a,form})$ está dada por

$$\hat{w}^2(\rho_{a,form}) = (2,2 \times 10^{-5})^2 + ((0,000 5 \text{ kg/m}^3)/(1,2 \text{ kg/m}^3))^2 / 3$$

$$= 5,835 \times 10^{-8} \quad (\text{A1.2-2})$$

$$\hat{w}(\rho_{a,form}) = 2,42 \times 10^{-4} \quad (\text{A1.2-3})$$

A1.3 Fórmula de Boyle-Mariotte

De la fórmula básica $p/\rho = RT$ se obtiene

$$\rho_a = \frac{\rho_{a,ref} T_{ref} p}{T p_{ref}} \quad (\text{A1.3-1})$$

Los valores de referencia se pueden seleccionar a conveniencia. Pueden ser los valores correspondientes determinados al momento de la calibración, o cualquier otro conjunto de valores convenientes.

Se puede ofrecer una modificación muy conveniente de esta fórmula como se muestra a continuación:

$$\rho_a = 0,992 65 \frac{(1,201 31 \text{ kg/m}^3)(293,15 \text{ K})p}{(273,15 + t)(1 015 \text{ hPa})} \quad (\text{A1.3-2})$$

ofrece valores dentro de $\pm 1,2 \%$ de los valores CIPM - vea A1.4 - para la justificación y alcance de aplicación.

A1.4 Errores de fórmulas

Se realizó una muestra de cálculos utilizando hojas de cálculos de EXCEL para comparar los resultados de la densidad de aire obtenidos por las fórmulas anteriores, contra los valores obtenidos por la fórmula del CIPM considerando $x_{CO-2} = 0,000 4$.

Se realizaron comparaciones en los siguientes alcances/intervalos de parámetros:

Temperatura	$t =$	- 10 °C...	10 °C...	+ 40 °C
Presión barométrica	$p =$	965 hPa ...	25 hPa...	1 065 hPa
Humedad relativa	$h_r =$	20 %...	15 %...	80 %

La diferencia más grande entre cualquier valor de una fórmula más sencilla y el valor correspondiente al de la fórmula del CIPM, y expresada en %, fue

Fórmula ↓	Diferencia Máxima	mayor	menor
→			
(A.1.1-1)		+ 0,004 %	- 0,144 %
(A.1.2-1)		+ 1,130 %	- 0,012 %
(A.1.3-1) Referencia $\rho_a = 1,200\ 13\ \text{kg/m}^3$		+ 1,931 %	- 0,45 %
(A.1.3-2) Referencia $\rho_a = 1,192\ 48\ \text{kg/m}^3$		+ 1,175 %	- 1,193 %

Nota:

Para $\rho_a = 1,200\ 13\ \text{kg/m}^3$, los valores de referencia fueron $t = 20\ ^\circ\text{C}$, $p = 1\ 014\ \text{hPa}$ y $h_r = 50\%$.

En la última línea los valores de referencia fueron $t = 20\ ^\circ\text{C}$, $p = 1\ 015\ \text{hPa}$, $h_r = 50\%$ mientras que la densidad de aire de referencia fue ajustada arbitrariamente a $\rho_{a,ref} = (1,201\ 31\ \text{kg/m}^3)(1-0,735\%) = 1,192\ 48\ \text{kg/m}^3$

para obtener una distribución entre + y - de las diferencias máximas contra los valores CIPM.

A1.5 Densidad del aire promedio

Cuando la medición de la temperatura y de la presión barométrica no es posible, la densidad del aire promedio del lugar se puede calcular de la altitud sobre el nivel del mar, tal como se recomienda en la fórmula E.3 [4]:

$$\rho_a = \rho_0 \exp\left(-\frac{\rho_0}{p_0} gh\right) \quad (\text{A1.5-1})$$

con $p_0 = 101\ 325\ \text{Pa}$

$\rho_0 = 1,200\ \text{kg/m}^3$

$g = 9,81\ \text{m/s}^2$

$h =$ altitud sobre el nivel del mar en m

A2 Variaciones de parámetros componentes de la densidad de aire

A2.1 Presión barométrica:

La presión barométrica promedio p_{av} se puede estimar de la altitud h en m sobre el nivel del mar SL de la locación, usando la relación

$$p(h) = p(SL) - h \times (0,12\ \text{hPa/m}) \quad (\text{A2.1-1})$$

con $p(SL) = 1\ 013,12\ \text{hPa}$

Para cualquier lugar, la variación máxima es $\Delta p = \pm 40$ hPa alrededor del promedio⁷.

Dentro de esos límites, la distribución no es rectangular ya que los valores extremos sólo ocurren una vez en varios años. Es más realista asumir una distribución normal, tomando a Δp como un valor de “ 2σ ” o hasta “ 3σ ”. Por lo tanto

$$u(\Delta p) = 20 \text{ hPa (para } k = 2) \text{ o } u(\Delta p) = 13,3 \text{ hPa (para } k = 3) \quad (\text{A2.1-2})$$

A2.2 Temperatura

La variación posible de la temperatura $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$ en el lugar de uso del instrumento se puede estimar de información que puede obtenerse fácilmente:

de los límites mencionados por la experiencia del cliente,
del promedio de lecturas de los registros adecuados,
del ajuste del instrumento de control, cuando el lugar está climatizado o en temperatura controlada;

en su defecto se debe aplicar algún criterio – por Ej.:

$17^{\circ}\text{C} \leq t \leq 27^{\circ}\text{C}$ para una oficina o un laboratorio cerrados con ventanas,
 $\Delta t \leq 5 \text{ K}$ para lugares sin ventanas en el centro de un edificio,
 $- 10^{\circ}\text{C} \leq t \leq + 30^{\circ}\text{C}$ o $\leq + 40^{\circ}\text{C}$ para talleres abiertos, salas de fábricas.

Como se ha mencionado para la presión barométrica, no es muy probable que ocurra una distribución rectangular para talleres abiertos o salas de fábricas en donde prevalece la temperatura atmosférica. De cualquier manera, para evitar suposiciones diferentes para diferentes situaciones del cuarto, se recomienda asumir una distribución rectangular, quedando,

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

A2.3. Humedad relativa

La posible variación de la humedad relativa $\Delta h_r = h_{r,\max} - h_{r,\min}$ en el lugar de uso del instrumento se puede estimar de información que se puede obtener fácilmente:

de los límites mencionados por la experiencia del cliente,
del promedio de lecturas de registros apropiados,
del ajuste del instrumento de control, si el lugar está climatizado;

⁷ Ejemplo: en Hannover, Alemania, la diferencia entre la presión barométrica más alta y la más baja observada durante 20 años fue 77,1 hPa (Información del DWD, Servicio Meteorológico Alemán) [1]

en su defecto se debería aplicar algún criterio, – por Ej.

- 30 % $\leq h_r \leq$ 80 % para una oficina o un laboratorio cerrados con ventanas,
- $\Delta h_r \leq$ 30 % para lugares sin ventanas en el centro de un edificio,
- 20 % $\leq h_r \leq$ 80 % para talleres abiertos, salas de fábricas.

Se debe tener en mente que

- en valores de $h_r <$ 40 % podrían influir en el resultado de pesada efectos electrostáticos, en instrumentos de alta resolución
- a $h_r >$ 60 % podría iniciar la corrosión.

Como se ha mencionado para la presión barométrica, una distribución rectangular no es muy probable que ocurra para talleres abiertos o salas de fábricas en donde la humedad relativa atmosférica prevalece. De cualquier manera, para evitar suposiciones diferentes para diferentes situaciones de lugares, se recomienda asumir una distribución rectangular, quedando

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

A3 Incertidumbre de la densidad de aire

La incertidumbre estándar de la densidad del aire $u(\rho_a)$ se puede calcular por

$$u^2(\rho_a) = c_p^2 u^2(\Delta p) + c_t^2 u^2(\Delta t) + c_{hr}^2 u^2(\Delta h_r) \quad (\text{A3.1-1})$$

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

$$c_p = 1,19 \times 10^{-3} \text{ para presión barométrica } (p, \Delta p \text{ en hPa})$$

$$c_t = -4,5 \times 10^{-3} \text{ para temperatura de aire } (t \text{ en } ^\circ\text{C})$$

$$c_{hr} = -10,5 \times 10^{-3} \text{ para humedad relativa } (h_r \text{ como fracción decimal})$$

Ejemplos de incertidumbre estándar de densidad del aire, calculada para diferentes parámetros

Δp /hPa	Δt / $^\circ\text{C}$	Δh_r	$c_p u(\Delta p)$	$c_t u(\Delta t)$	$c_{hr} u(\Delta h_r)$	$u(\rho_a)$ / kgm^{-3}	Distribución
40	2	0,2	0,015 87	-0,002 60	-0,000 61	0,016 1	Normal
40	2	1	0,015 87	-0,002 60	-0,003 03	0,016 4	Normal
40	5	0,2	0,015 87	-0,006 50	-0,000 61	0,017 2	Normal
40	5	1	0,015 87	-0,006 50	-0,003 03	0,017 4	Normal
40	10	0,2	0,015 87	-0,012 99	-0,000 61	0,020 5	Normal
40	10	1	0,015 87	-0,012 99	-0,003 03	0,020 7	Normal
40	20	0,2	0,015 87	-0,025 98	-0,000 61	0,030 4	Normal

40	20	1	0,015 87	-0,025 98	-0,003 03	0,030 6	Normal
40	30	0,2	0,015 87	-0,038 97	-0,000 61	0,042 1	Normal
40	30	1	0,015 87	-0,038 97	-0,003 03	0,042 2	Normal
40	40	0,2	0,015 87	-0,051 96	-0,000 61	0,054 3	Normal
40	40	1	0,015 87	-0,051 96	-0,003 03	0,054 4	Normal
40	50	0,2	0,015 87	-0,064 95	-0,000 61	0,066 9	Rectangular ⁸
40	50	1	0,015 87	-0,064 95	-0,003 03	0,066 9	Rectangular ⁹

El coeficiente de sensibilidad para temperatura c_t puede diferir en hasta 3 % del valor citado anteriormente, dependiendo de la variación correspondiente de la densidad que resulta de diferentes intervalos de temperatura – vea la tabla siguiente. De cualquier manera esta situación no es relevante para calibraciones normales.

Coefficientes de sensibilidad c_t para la densidad del aire

Las condiciones de referencia son: $p = 101,4$ hPa, $t = 20^\circ\text{C}$ y $h_r = 50\%$

Δt		+/- 5°C	+/- 10°C	+/- 15°C	+/- 20°C	+/- 25°C	+/- 30°C	- 10°C/+40°C
c_t	-0,004 463#	-0,004 438	-0,004 45	-0,004 47	-0,004 498	-0,004 534	-0,004 578	-0,004 601

Derivada de la fórmula del CIPM para la densidad de aire

Diferentes coeficientes derivados de la diferencia en ρ_a y la correspondiente en t

⁸ La distribución está dominada por la contribución de la temperatura $c_{t,u}(\Delta t)$

⁹ La distribución está dominada por la contribución de la temperatura $c_{t,u}(\Delta t)$

APÉNDICE B FACTOR DE COBERTURA k PARA LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DE LA MEDICIÓN

Nota: en este Apéndice el símbolo general y es utilizado para el resultado de la medición, no como una magnitud particular, como una indicación, un error, un valor de masa de un objeto pesado, etc.

B1 Objetivo

El factor de cobertura k debe ser elegido para todos los casos tal que la incertidumbre expandida de medición tenga una cobertura de probabilidad de aproximadamente el 95 %.

B2 Condiciones básicas para la aplicación de $k = 2$

Un factor $k = 2$ se aplica cuando se cumplen las siguientes condiciones:

se puede asignar una **distribución normal** a la estimación resultante y y $u(y)$ es **suficientemente confiable**, vea [2].

Se puede suponer una distribución normal cuando varios componentes de la incertidumbre (por Ej. $N \geq 3$), cada uno derivado de distribuciones de “comportamientos comunes” (normal, rectangular o semejantes), contribuyen a $u(y)$ en cantidades comparables - vea [2].

Nota: esto implica que ninguna de las contribuciones con distribución diferente a la normal es un valor dominante como está definido en B.3.2.

La **suficiente confiabilidad** depende de los grados efectivos de libertad. Este criterio se cumple si ninguna contribución Tipo A de $u(y)$ está basada en menos de 10 observaciones.

vea [2].

B3 Determinando k para otros casos

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

B3.1 Distribución asumida como normal

Donde la distribución del estimado de la variable de salida y se puede suponer como una distribución normal, pero $u(y)$ no es lo suficientemente confiable – vea B.2 – entonces los grados efectivos de libertad ν_{eff} se tienen que determinar usando la fórmula de Welch-Satterthwaite, y el valor de $k > 2$ se obtiene de la tabla correspondiente, de acuerdo a [2].

B3.2 Distribución no normal

Puede ser obvio en una situación determinada que $u(y)$ contiene un componente de incertidumbre Tipo B de $u_1(y)$ que tiene una contribución con distribución no normal, por Ej. rectangular o triangular, la cual es considerablemente mayor que el resto de los componentes. En tal caso, $u(y)$ se divide en la parte (posiblemente dominante) u_1 y en $u_R =$ raíz cuadrada de $\sum u_j^2$ con $j \geq 2$, la incertidumbre estándar combinada incluye las contribuciones restantes, vea [2]

Si $u_R \leq 0,3 u_1$, entonces u_1 se considera como “dominante“ y la distribución de y es considerada básicamente idéntica a la de la contribución dominante.

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

para una distribución trapezoidal $\beta < 0,95$:

($\beta =$ parámetro de lado, razón de lado menor al lado mayor del trapezoide)

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

para una distribución rectangular ($\beta = 1$): $k = 1,65$ – vea [1]

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

para una distribución tipo U: $k = 1,41$

El componente dominante puede a su vez estar compuesto de dos componentes dominantes $u_1(y)$, $u_2(y)$, por Ej. dos rectángulos formando un trapezoide, el cual caso u_R será determinado del restante u_j con $j \geq 3$

APÉNDICE C: FÓRMULAS PARA DESCRIBIR LOS ERRORES CON RELACIÓN A LAS INDICACIONES

C1 Objetivo

Este Apéndice ofrece consejo sobre como derivar errores e incertidumbres asignadas para cualquiera otra lectura R de los valores discretos obtenidos durante la calibración y/o presentados en el certificado de calibración, dentro del alcance de pesada que se ha calibrado.

Se supone que la calibración ofrece resultados de n juegos de datos I_{Nj} , E_j , U_j , o alternativamente m_{Nj} , I_j , U_j , en conjunto con el factor de cobertura k y la indicación de la distribución de E dependiendo de k .

En cualquier caso, la indicación nominal I_{Nj} se considera como $I_{Nj} = m_{Nj}$.

Además se supone que para cualquier m_{Nj} el error E_j permanece igual si se reemplaza I_j por I_{Nj} , así que para mayor simplicidad es suficiente verificar los datos I_{Nj} , E_j , U_j y omitir el sufijo N .

C2 Relaciones funcionales

C2.1 Interpolación

Existen varias fórmulas polinomiales para la interpolación¹⁰, entre valores indicados en tablas contra argumentos equidistantes, que son fáciles de utilizar. De cualquier manera, las cargas de prueba pueden, en muchos casos, no ser equidistantes en la escala del instrumento, lo que implica que la fórmula de interpolación sea bastante complicada si se busca una fórmula particular para cubrir todo el alcance de medición.

La interpolación lineal entre dos puntos vecinos se puede realizar por

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

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

una lectura R con $I_k < R < I_{k+1}$. Se requiere un polinomio de mayor orden para estimar el posible error de interpolación – eso no se tratará en lo sucesivo.

C2.2 Aproximación

La aproximación se debería realizar por cálculos o algoritmos basados en el método de "minimizar χ^2 ":

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

¹⁰ Como fórmula de interpolación se entiende como aquella fórmula que ofrece valores exactos entre cuáles se realiza la interpolación. Una fórmula de aproximación normalmente no dará los valores exactos.

Con:

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

v_j = residual

f = función de aproximación conteniendo n_{par} parámetros

En conjunto con los coeficientes de la función de aproximación, la suma de los cuadrados de las desviaciones debería determinarse según (C.2.2-1), el cual es denominado por el término $\min\chi^2$. Eso sirve para verificar la validez de la aproximación.

Si se cumple la siguiente condición:

$$|\min\chi^2 - \nu| \leq \beta\sqrt{(2\nu)} \quad (C2.2-2)$$

con

$\nu = n - n_{par}$ = grados de libertad, y

β = factor elegido entre 1, 2 (valor que más aplicado), o 3,

justifica asumir que la forma de la función modelo $E(I)$ es matemáticamente consistente con las datos en cuáles está basada la aproximación.

C2.2.1 Aproximación por polinomios

Aproximación por polinomios da la función general

$$E(R) = f(R) = a_0 + a_1R + a_2R^2 + \dots + a_{na}R^{na} \quad (C2.2-3)$$

El sufijo/exponente n_a del coeficiente se debería elegir tal que $n_{par} = n_a + 1 \leq n/2$.

El cálculo se realiza de mejor manera mediante cálculo matricial.

Sea

- X** una matriz cuyos n renglones son $(1, I_j, I_j^2, \dots, I_j^{na})$
- a** un vector columna cuyos componentes son los coeficientes a_0, a_1, \dots, a_{na} del polinomio de aproximación
- e** sea un vector columna cuyos n componentes son E_j
- U(e)** es la matriz de incertidumbres de E_j .

U(e) es o una matriz diagonal cuyos elementos son $u_{jj} = u^2(E_j)$, o ha sido derivado como una matriz completa de varianza/covarianza.

La matriz de ponderación **P** es

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

y los coeficientes a_0, a_1, \dots se encuentran al resolver la ecuación normal

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

con la solución

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{e} \quad (\text{C2.2-6})$$

Las n desviaciones $v_j = f(I_j) - E_j$ están incluidas en el vector

$$\mathbf{v} = \mathbf{X} \mathbf{a} - \mathbf{e} \quad (\text{C2.2-7})$$

y el $\min \chi^2$ se obtiene por

$$\min \chi^2 = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \quad (\text{C2.2-8})$$

Si se cumple la condición de (C.2.2-2), las variancias y covarianzas para los coeficientes a_i se obtienen de la matriz

$$\mathbf{U}(\mathbf{a}) = (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} \quad (\text{C2.2-9})$$

Si la condición (C.2.2-2) no se cumple, se puede aplicar uno de los siguientes procedimientos:

- a: repetir la aproximación con un número mayor de coeficientes n_a mientras $n_a + 1 \leq n/2$;
- b: repetir la aproximación después de incrementar todos los valores u_j por Ej. por multiplicación con un factor apropiado $c > 1$.
($\min \chi^2$ es proporcional a $1/c^2$)

Los resultados de la aproximación \mathbf{a} y $\mathbf{U}(\mathbf{a})$ pueden ser utilizados para determinar los errores aproximados y las incertidumbres asignadas para los n puntos de calibración I_j .

Los errores E_{apprj} están incluidos en el vector

$$\mathbf{e}_{appr} = \mathbf{X} \mathbf{a} \quad (\text{C2.2-10})$$

con las incertidumbres calculadas por

$$u^2(E_{pprj}) = \text{diag}(\mathbf{X} \mathbf{U}(\mathbf{a}) \mathbf{X}^T) \quad (\text{C2.2-11})$$

Estas incertidumbres también sirven para determinar el error, y la incertidumbre asignada para cualquiera otra indicación – llamada una lectura R para poder diferenciar de las indicaciones I_j – dentro del alcance de pesada calibrado.

Sea

\mathbf{r} sea un vector columna cuyos elementos son $(1, R, R^2, R^3, \dots, R^{na})^T$,

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

El error es

$$E_{appr}(R) = \mathbf{r}^T \mathbf{a} \quad (\text{C2.2-12})$$

y la incertidumbre se obtiene mediante

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

Como las tres matrices del primer término del lado derecho son unidimensionales, se simplifica de la siguiente manera

$$(\mathbf{r}'^T \mathbf{a}) \mathbf{U}(R) (\mathbf{r}'^T \mathbf{a})^T = (a_1 + 2a_2 R + 3a_3 R^2 + \dots + n_a a_{n_a} R^{n_a-1})^2 u^2(R) \quad (\text{C2.2-14})$$

con $u^2(R) = d_0^2/12 + d_R^2/12 + s^2(I)$ conforme a (7.1.1.-11).

C2.2.2 Aproximación a una línea recta

Muchos instrumentos electrónicos modernos tienen un buen diseño y son internamente corregidos para conseguir una buena linealidad de la función $I = f(m)$. Por lo tanto muchas veces los errores son el resultado de un ajuste incorrecto y en general aumentan en proporción a R . Para tales instrumentos puede ser muy apropiado restringir la función polinomial a una lineal, suponiendo que es suficiente considerando la condición en (C.2.2-2).

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

$$E(R) = f(R) = a_0 + a_1 R \quad (\text{C2.2-15})$$

Una variante sería fijar $a_0 = 0$ y determinar sólo a_1 . Esto puede justificarse con el hecho del ajuste a cero – por lo menos para cargas ascendentes – el error $E(R = 0)$ automáticamente es = 0:

$$E(R) = f(R) = a_1 R \quad (\text{C2.2-16})$$

Otra variante es definir el coeficiente a ($=a_1$ en (C2.2-16)) como el promedio de todos los gradientes $q_j = E_j/I_j$. Esto permite la inclusión de los errores de las indicaciones netas después del ajuste a cero de la balanza (tarar) si éstos se han determinado durante la calibración:

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

Los cálculos, con excepción de la variante (C2.2-17), se pueden realizar usando la fórmula matricial de C.2.2.1.

Más adelante se ofrecen otras posibilidades.

C2.2.2.1 La Regresión lineal según (C2.2-12) se puede realizar con cualquier calculadora

normal de bolsillo.

La correspondencia entre los resultados es típicamente,

$$\text{"intersección"} \Leftrightarrow a_0$$

$$\text{"pendiente"} \Leftrightarrow a_1$$

De cualquier manera, las calculadoras podrían no poder realizar regresiones lineales de los datos de los errores de pesada, o regresiones lineales con $a_0 = 0$.

C2.2.2.2 Para facilitar la programación de cálculos por computadoras en una notación no matricial, las fórmulas relevantes se presentan a continuación. Todas las fórmulas incluyen los factores de ponderación $p_j = 1/u^2(E_j)$

Por simplicidad todos los índices "j" han sido omitidos de I , E , p

a) regresión lineal para (C2.2-15)

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

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

$$\min \chi^2 = \sum p(a_0 + a_1 I - E)^2 \quad (\text{C2.2-15c})$$

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

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

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

(C.2.2-15) aplica para el error aproximado de la lectura R , y la incertidumbre de la aproximación $u(E_{appr})$ se obtiene mediante

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

b) regresión lineal con $a_0 = 0$

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

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

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

(C.2.2-16) aplica para el error aproximado de la lectura R , y la incertidumbre asignada $u(E_{appr})$ se obtiene mediante

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

c) promedio de gradientes

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

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

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

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

(C.2.2-16) aplica para el error aproximado de la lectura R la cual también podría ser una indicación neta, y la incertidumbre de la aproximación $u(E_{appr})$ está dada por

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

C3 Términos sin relación con las lecturas

Mientras que los términos que no son una función de la indicación no ofrecen ningún valor estimado para un error esperado de una lectura dada en uso, éstos pueden ser útiles para obtener la “incertidumbre global” mencionada en 7.5.2.

C3.1 Error medio

El promedio de todos los errores es

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

con la desviación estándar

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

Nota: el dato puntual $I = 0$, $E = 0$ debe ser incluido como I_1 , E_1 .

Cuando \bar{E} es cercano a cero, sólo $s^2(E)$ debería ser añadido en (7.5.2-2a). En

otros casos, en particular si $|\bar{E}| \geq u(W)$, se debería usar (7.5.2-3a), con $u(W)$ mas $u_{appr} = s(E)$.

C3.2 Error máximo

El “error máximo” se debería entender como el mayor error en valor absoluto:

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

C3.2.1 Con $E^0 = E_{\max}$, (7.5.2-3a) describiría seguramente a una “incertidumbre global” que cubriría cualquier error en el alcance de pesada con una cobertura de probabilidad mayor al 95 %. La ventaja es que la fórmula es simple y directa.

C3.2.2 Asumiendo una distribución rectangular para todos los errores en el alcance - ficticio!- $\pm E_{\max}$, E^0 se podría definir como desviación estándar de los errores

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

para insertarse en (7.5.2-2a).

APÉNDICE D: SÍMBOLOS Y TÉRMINOS

D1 Símbolos de aplicación general

Los símbolos que son utilizados en más de una sección del documento principal, se muestran y explican a continuación

Símbolo	Definición	Unidad
C	corrección	
D	deriva, variación de un valor con el tiempo	
E	error (de una indicación)	g, kg, t
I	indicación de un instrumento	g, kg, t
L	carga sobre un instrumento	g, kg, t
Max	capacidad máxima de pesada	g, kg, t
Max'	límite superior especificado del alcance de pesada, $Max' < Max$	g, kg, t
Min	valor de carga por debajo del cual el resultado de pesada puede ser sujeto a un error relativo excesivo	g, kg, t
Min'	límite inferior especificado del alcance de pesada, $Min' > Min$	g, kg, t
R	indicación (lectura) de un instrumento no relacionado con una carga de prueba	g, kg, t
T	temperatura	°C, K
Tol	valor de tolerancia especificado	
U	incertidumbre expandida	g, kg, t
W	resultado de pesada, pesa en aire	g, kg, t

d	Intervalo de escala, la diferencia en masa entre dos indicaciones consecutivas del dispositivo de indicación	g, kg, t
d_T	Intervalo de escala efectivo $< d$, utilizado en pruebas de calibración	g, kg, t
k_x	número de piezas x , como se indica en cada caso	
k	factor de cobertura	
M	masa de un objeto	g, kg, t
m_c	valor de masa convencional, preferiblemente de una pesa patrón	g, kg, t
m_N	valor nominal de masa convencional de una pesa patrón	g, kg, t
m_{ref}	pesa de referencia (“valor verdadero“) de una carga de prueba	g, kg, t
mpe	error máximo permitido (de una indicación, una pesa patrón, etc.) en un contexto dado	g, kg
n	número de piezas, como se indique en cada caso	
s	desviación estándar	
t	tiempo	h, min
u	incertidumbre estándar	
\hat{w}	incertidumbre estándar relativa a cantidad base	

ν	número de grados de libertad	
ρ	Densidad	kg/m ³
ρ_0	densidad de referencia del aire, $\rho_0 = 1,2$ kg/m ³	kg/m ³
ρ_a	densidad de aire	kg/m ³
ρ_c	densidad de referencia de una pesa patrón, $\rho_c = 8\,000$ kg/m ³	kg/m ³

-Sufijo	relacionado con
<i>B</i>	empuje de aire
<i>D</i>	deriva
<i>N</i>	valor nominal
<i>T</i>	prueba
<i>adj</i>	ajuste
<i>appr</i>	aproximación
<i>cal</i>	calibración
<i>conv</i>	convección
<i>dig</i>	digitalización
<i>ecc</i>	carga excéntrica
<i>gl</i>	global, total
<i>i</i>	numeración
<i>intr</i>	instrumento de pesada
<i>j</i>	numeración
max	valor máximo de una población existente
min	valor mínimo de una población existente
<i>proc</i>	procedimiento de pesada
<i>ref</i>	referencia
<i>rep</i>	repetibilidad
<i>s</i>	(masa) estándar; actual a la hora de ajuste
<i>sub</i>	carga de sustitución
<i>tare</i>	operación de ajuste a cero de la balanza
<i>temp</i>	temperatura
<i>time</i>	tiempo
0	cero, sin carga

D2 Localización de términos y expresiones importantes

D2.1 Pruebas de calibración y resultados de medición

Cantidad	Componentes de incertidumbre estándar	Secciones, subsecciones
Indicación I_j para una carga de prueba discreta m_j		4.4.1; 6.2.1
Indicación I $I = I_L + \delta I_{digL} + \delta I_{rep} + \delta I_{ecc} - I_0 - \delta I_{dig0}$ $u^2(I) = u^2(\delta I_{digL}) + u^2(\delta I_{rep}) + u^2(\delta I_{ecc}) + u^2(\delta I_{dig0})$	$u(I)$ compuesta de $d_0/\sqrt{12} + d_L/\sqrt{12}$ para el redondeo, s o s_{pool} para repetibilidad, $\hat{w}(I_{ecc})I$ para la excentricidad de una carga de prueba	4.4; 6; 7.1 7.1.1; 7.1.1.5; 7.1.1.1+2 7.1.1.3 7.1.1.4
Repetibilidad Medio de n indicaciones: $\bar{I}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{ji}$	Desviación estándar: $s(I_j) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{ji} - \bar{I}_j)^2}$	4.4; 6.1
Excentricidad $\Delta I_{ecc i} = I_i - I_1$	$\hat{w}(I_{ecc}) = \Delta I_{ecc, i} _{\max} / (2L_{ecc} \sqrt{3})$	6.3; 7.1.1.4
Masa de referencia m_{ref} $m_{ref} = m_N + \delta m_c + \delta m_B + \delta m_D + \delta m_{conv}$ $u^2(m_{ref}) = u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D) + u^2(\delta m_{conv})$ Para cargas de prueba L_{Tn} compuesta por cargas de sustitución: $u^2(L_{Tn}) = n^2 u^2(m_{c1}) + 2 \sum_{j=1}^n u^2(I_{j-1})$	$u(m_{ref})$ compuesta de $u(\delta m_c)$ o $\hat{w}(m_c)$ para calibración, $\hat{w}(m_B)$ para el empuje de aire, $u(m_D)$ para la deriva, $u(m_{conv})$ para la convección, $u(m_{c1}) = u(m_{ref})$ como se indica anteriormente $u(I_{j-1}) = u(I(L_{Tj-1}))$	4.3; 7.1 7.1.2, 7.1.2.5 + 6 7.1.2.1 7.1.2.2, Apéndices A + E 7.1.2.3; 7.1.2.4 Apéndice F 7.1.1.5
Error E $E = I - m_{ref}$ $u^2(E) = u^2(I) + u^2(m_{ref})$	sin efectos de convección: $u^2(E) = \alpha^2 + \beta^2 I^2$	6.2.1 7.1; 7.1.3
Curva característica $E_{appr} = f(I)$, basado en conjuntos de datos $I_j, E_j, u(E_j)$ $u(E_{appr}) = g(I)$	$u(E_{appr})$ resultando del cálculo de aproximación	6.2; 7.2; Apéndice C
Incertidumbre expandida: $U(E) = ku(E)$ con $k = 2$ (distribución normal) o $k \neq 2$		7.3; Apéndice B

D2.2 Resultados de pesada obtenidos por el usuario del instrumento

Cantidad	Componentes de la incertidumbre estándar	Secciones, subsecciones
<p>Lectura por el usuario: $R = R_L + \delta R_{digL} + \delta R_{rep} - R_0$ $- \delta R_{dig0} (+ \delta R_{ecc})$ $u^2(R) = u^2(\delta R_{digL}) + s^2 + u^2(\delta R_{dig0})$</p>	$u(I)$ como se indicó anteriormente, basado en d , no en d_T	7.4 7.4.1
<p>Error de lectura: $E(R) = E(I_j)$, y $u(E_{cal})$ del certificado de calibración, o por interpolación entre valores conocidos, o $E_{appr} = f(I)$, fórmula de aproximación con $u[E_{appr}]$ valores de E redondeados a d</p>	$u(E_{cal}) = U(E_{cal})/k_{cal}$ $u[E_{appr}(R)] = f(R) = g(I)$ como se indicó anteriormente $u[E_{appr}(R)] = U[E(R)]/k_{cal}$	7.4 7.4.2
<p>Resultados de pesada W^* basados en datos de calibración: $W^* = R - E$ $u^2(W^*) = u^2(R) + u^2(E)$ W en uso diario: $W = W^* + \delta R_{instr} + \delta R_{proc}$ $u^2(W) = u^2(W^*) + u^2(\delta R_{instr}) + u^2(\delta R_{proc})$ δR_{instr} y δR_{proc} por efectos ambientales y de manejo del instrumento siendo diferentes a las condiciones de calibración</p>	$u(W^*)$ compuesta por $u(R)$ como se indica anteriormente $u(E(R))$ indicada previamente $u(\delta R_{instr})$ compuesta por $\hat{w}(R_{temp})$ para temperatura $\hat{w}(R_{bouy})$ para la variación de la densidad de aire $\hat{w}(R_{adj})$ para deriva a largo plazo $u(\delta R_{proc})$ compuesta por $\hat{w}(R_{tare})$ $\hat{w}(R_{time})$ $\hat{w}(R_{ecc})$ s_{dyn}	7.4 (7.4-1a) (7.4-2a) 7.4.1 7.4.2 (7.4.-1b); 7.4.5 (7.4-2b) 7.4.3.1 7.4.3.2 7.4.3.3 7.4.4 7.4.4.1 7.4.4.2 7.4.4.3 7.4.4.4
<p>Incertidumbre expandida: $U(W^*) = ku(W^*)$ con $k = 2$ (distribución normal) ó $k \neq 2$ $U(W) = ku(W)$ con $k = 2$</p>		7.5, Apéndice B
<p>Resultado de pesada con corrección: $W = R - E \pm U(W)$</p>	$U(W)$ obtenida anteriormente	7.5.1

<p>Resultados de pesada sin corrección: $W = R \pm U_{gl}(W)$ con $U_{gl}(W) = f\{U(W) + E(R)\}$</p>	<p>$U(W)$ obtenida anteriormente, e incrementada por el término $E(R)$</p>	<p>7.5.2</p>
<p>Resultado de pesada dentro de los límites especificados: $W = R \pm Tol(R)$ con Tol especificado por el cliente, bajo la condición que $E(R) + U(W(R)) \leq Tol(R)$</p>		<p>7.5.3</p>
<p>Conversión de W de masa m, o al valor de masa convencional m_c</p>	<p>a ser calculado con base a W por el usuario del instrumento</p>	<p>9.1 9.2</p>

APÉNDICE E: INFORMACIÓN DEL EMPUJE DEL AIRE

Este Apéndice ofrece información adicional a la corrección por empuje del aire tratada en 7.1.2.2. Se concentra en la incertidumbre estándar para la corrección, conforme a 7.1.2.2 ofrece consejos para la aplicación de un valor de corrección $\delta m_B = 0$ con un valor apropiado de desviación estándar.

E1 Densidad de las pesas patrón

Si la densidad ρ de una pesa patrón, y su incertidumbre estándar $u(\rho)$ no son valores conocidos, se pueden usar los siguientes valores para pesas de las clases E₂ a M₂ de la OIML R 111-1 (tomado de [4], Tabla B7).

Aleación/material	Densidad supuesta ρ en kg/m ³	Incertidumbre estándar $u(\rho)$ en kg/m ³
plata níquel	8 600	85
latón	8 400	85
acero inoxidable	7 950	70
acero al carbón	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 una cavidad de ajuste llena con una cantidad considerable de materiales de diferentes densidades, la referencia [4] presenta una fórmula para calcular la densidad global de la pesa.

E2 Ejemplos para el empuje del aire en general

La tabla E2.1 ofrece incertidumbres estándares relativas suponiendo que las correcciones del empuje del aire son iguales a cero, para

- pesas patrón fabricadas en aleaciones/materiales mencionados en E1
- incertidumbres estándares seleccionadas de densidad del aire – vea la tabla en A3.1
- los casos A, B1 y B2 relacionados con el ajuste del instrumento calibrado.

Las fórmulas son (7.1.2-5) para el caso A, (7.1.2-7) para el caso B1 y (7.1.2-9) para el caso B2.

Para el caso B1, se ha asumido $u(\delta\rho_{as}) = 0,5u(\rho_a)$

Es obvio que para el caso A la incertidumbre relativa $\hat{w}(m_B)$ esta siempre por debajo 0,4 mg/kg para los materiales normalmente utilizados para las pesas patrones de mayor clase de exactitud (actualmente acero inoxidable, anteriormente latón), pero de cualquier manera requiere ser considerado para calibraciones con incertidumbre

extremadamente pequeña.

Para calibraciones del caso B1, la incertidumbre relativa $\hat{w}(m_B)$ es menor que 5 mg/kg para todos los materiales, excepto para el aluminio y para las calibraciones del caso B2 es menor a 10 mg.

Tabla E2.1 Incertidumbre estándar relativa para la corrección del empuje de aire

$\hat{w}(m_B)$ en mg/kg para caso A			$\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$ con $u(\rho_a)$ menor que			
Material	ρ	$u(\rho)$	0,016	0,025	0,04	0,064
plata níquel	8 600	85	0,14	0,22	0,35	0,56
latón	8 400	85	0,10	0,15	0,24	0,39
acero inoxidable	7 950	70	0,02	0,03	0,05	0,09
hierro fundido (blanco)	7 700	200	0,09	0,15	0,24	0,38
hierro fundido (gris)	7 100	300	0,27	0,42	0,68	1,08
aluminio	2 700	65	3,93	6,14	9,82	15,71

$\hat{w}(m_B)$ en mg/kg para caso B1			$\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$ con $u(\rho_a)$ menor que			
Material	ρ	$u(\rho)$	0,016	0,025	0,04	0,064
plata níquel	8 600	85	1,01	1,58	2,52	4,04
latón	8 400	85	1,01	1,57	2,51	4,02
acero inoxidable	7 950	70	1,00	1,56	2,50	4,00
hierro fundido (blanco)	7 700	200	1,00	1,57	2,51	4,01
hierro fundido (gris)	7 100	300	1,03	1,61	2,58	4,13
aluminio	2 700	65	4,05	6,33	10,13	16,21

$\hat{w}(m_B)$ en mg/kg para caso B2			$\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$ con $u(\rho_a)$ menor que			
Material	ρ	$u(\rho)$	0,016	0,025	0,04	0,064
plata níquel	8 600	85	1,86	2,91	4,65	7,44
latón	8 400	85	1,90	2,98	4,76	7,62
acero inoxidable	7 950	70	2,01	3,14	5,03	8,05
hierro fundido (blanco)	7 700	200	2,08	3,25	5,20	8,31
hierro fundido (gris)	7 100	300	2,26	3,52	5,64	9,02
aluminio	2 700	65	5,93	9,26	14,82	23,71

E3 Empuje del aire para pesas conforme a OIML R 111

Como se ha citado en la nota al pie de 7.1.2.2, la OIML R 111-1 requiere que la densidad de la pesa patrón este dentro de ciertos límites los cuales están relacionados con el error máximo permitido mpe y una variación específica de la densidad del aire. Los mpe son proporcionales al valor nominal para pesas ≥ 100 g. Esto permite una estimación de la incertidumbre relativa $\hat{w}(m_B)$. Las fórmulas correspondientes (7.1.2-5a) para el caso A y (7.1.2-9a) para los casos B1 y B2 han sido evaluadas en la Tabla E2.2, en relación con las clases de exactitud de E₂ a M₁.

Para pesas de $m_N \leq 50$ g los mpe se encuentran en una Tabla de la OIML R 111-1, el valor relativo mpe/m_N aumenta conforme la masa decrece. Para estas pesas, la Tabla E2.2 contiene las incertidumbres estándares absolutas $u(m_B) = \hat{w}(m_B)m_N$.

Una comparación de las incertidumbres relativas muestra que los valores de la Tabla E2.2 son siempre mayores que los valores correspondientes a los de la Tabla E2.1. Esto se debe al hecho de que las incertidumbres supuestas $u(\rho)$ y $u(\rho_a)$ son mayores en la Tabla E2.2.

Los valores de la Tabla E2.2 se pueden usar para una estimación del “peor caso” de la contribución de incertidumbre para el empuje del aire en una situación dada.

Tabla E2.2: Incertidumbre estándar para la corrección por empuje del aire para pesas patrón conforme a la OIML R 111-1
 Calculadas de acuerdo a 7.1.2.2 para los casos A (7.1.2-5a) y B (7.1.2-9a)

	Clase E ₂			Clase F ₁			Clase F ₂			Clase M ₁		
m_N en g	mpe en mg	u_A en mg	u_B en mg	mpe en mg	u_A en mg	u_B en mg	mpe en mg	u_A en mg	u_B en mg	mpe 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	0,015	0,002	0,003	0,05	0,007	0,008	0,15	0,02	0,02	0,5	0,07	0,07
mpe Relativo e incertidumbres estándar relativas $\hat{w}(m_B)$ en mg/kg para pesas de 100 g y mayores												
	Clase E ₂			Clase F ₁			Clase F ₂			Clase M ₁		
	mpe/m_N	\hat{w}_A	\hat{w}_B	mpe/m_N	\hat{w}_A	\hat{w}_B	mpe/m_N	\hat{w}_A	\hat{w}_B	mpe/m_N	\hat{w}_A	\hat{w}_B
≥ 100	1,500	0,22	8,88	5,00	0,72	9,38	15,00	2,17	10,83	50,0	7,22	15,88

APÉNDICE F: EFECTOS DE CONVECCIÓN

En 4.2.3 se ha explicado la generación de un aparente cambio de masa Δm_{conv} debido a una diferencia de temperatura ΔT entre una pesa patrón y el medio ambiente. A continuación se presenta información con mayor detalle que permite realizar una mejor valoración de las situaciones en las cuáles se debería considerar el efecto de convección considerando la incertidumbre de la calibración esperada. Los cálculos de los valores presentados en las tablas siguientes están basados en [6]. Las fórmulas relevantes, y parámetros a incluir, no se encuentran aquí. Sólo se hace referencia a la fórmula principal y a las condiciones esenciales.

El problema tratado aquí es muy complejo, tanto en la física del fenómeno como en la evaluación de los resultados experimentales. La precisión de los valores presentados a continuación no debería ser sobreestimado.

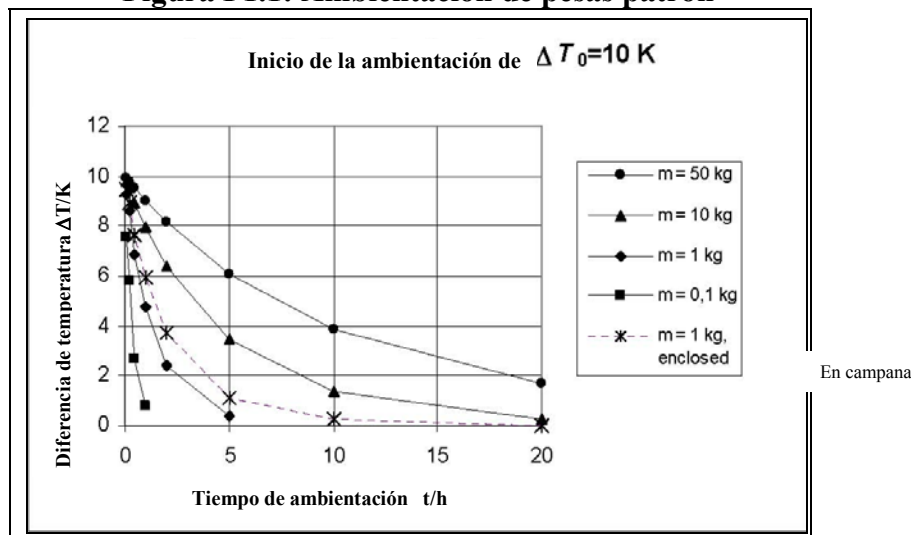
F1 Relación entre temperatura y tiempo

Una diferencia inicial de temperatura ΔT_0 se reduce con un tiempo Δt por el intercambio de calor entre la pesa y el medio ambiente. La razón de intercambio de calor es independiente del signo de ΔT_0 , así que calentar o enfriar una pesa ocurre en intervalos de tiempo similares.

Imagen F.1.1 presenta algunos ejemplos del efecto de ambientación. Empezando con una diferencia inicial de temperatura de 10 K, la ΔT se muestra para 4 pesas diferentes después de diferentes tiempos de ambientación. Se supone que las pesas permanecen en 3 columnas iguales de PVC delgadas al “aire libre”. En comparación, también se muestra ΔT para una pesa de 1 kg ubicada en las mismas columnas pero contenida en una campana de vidrio que reduce el flujo de aire de convección, así que se requiere cerca de 1,5 a 2 veces más de tiempo para conseguir la misma reducción de ΔT , que la pieza de 1 kg sin la campana.

Referencias en [6]: fórmula (21), y parámetros para los casos 3b y 3c en la Tabla 4

Figura F1.1: Ambientación de pesas patrón



En las Tablas F1.2 y F1.3 se muestran los tiempos de ambientación Δt que quizá hubieran tenido que esperar las pesas patrón si la diferencia de temperatura se tiene que reducir de un valor ΔT_1 a uno menor ΔT_2 . Las condiciones de intercambio de calor son las mismas que en la figura F1.1: En la tabla F1.2 para “ $m = 0,1 \text{ kg}$ ” hasta “ $m = 50 \text{ kg}$ ”; en la tabla F1.3 para “ $m = 1 \text{ kg}$ en campana”.

Bajo condiciones reales los tiempos de espera pueden ser más cortos si una pesa está en una superficie plana de un soporte que sea conductor de calor; estos tiempos pueden ser mayores si una pesa esta parcialmente encerrada en su estuche. Referencias en [6]: fórmula (26), y parámetros para los casos 3b, 3c en la Tabla 4.

Tabla F1.2 Intervalos de tiempo para la reducción en pasos de diferencias de temperatura

Pesas que se encuentran en 3 columnas delgadas de PVC en aire libre.

Tiempo de ambientación en min por ΔT a ser alcanzado por el siguiente ΔT mayor, Caso 3b								
	$\Delta T / \text{K}$							
m/kg	20	15	10	7	5	3	2	1
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 ΔT de 20 K a 15 K se tardará 20,8 min;

para reducir ΔT de 15 K a 10 K se tardará 30,7 min;

para reducir ΔT de 10 K a 5 K se tardará 28,3 min + 27,8 min = 56,1 min

Tabla F1.3 Intervalos de tiempo para una reducción en pasos de diferencias de temperatura

Las pesas se encuentran en 3 columnas delgadas de PVC, contenidas en una campana de vidrio

Tiempo de ambientación en min por ΔT a ser alcanzado por el siguiente ΔT mayor, Caso 3c								
	$\Delta T / \text{K}$							
m/kg	20	15	10	7	5	3	2	1
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	49,9	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 ΔT está dirigido hacia arriba si la pesa está más caliente que el medio ambiente $-\Delta T > 0$ -, y hacia abajo si está más fría $-\Delta T < 0$. El flujo de aire causa fuerzas de fricción en la superficie vertical de una pesa y fuerzas de empuje o tensión en sus superficies horizontales, resultando en un cambio de la masa aparente Δm_{conv} . El receptor de carga del instrumento también contribuye a este cambio, sin embargo aún no se ha investigado completamente de que manera.

Existe evidencia de experimentos de que los valores absolutos del cambio generalmente son más pequeños para $\Delta T < 0$ que para $\Delta T > 0$. Así que es razonable calcular los cambios de masa para los valores absolutos de ΔT usando los parámetros de $\Delta T > 0$.

La Tabla F2.1 muestra valores de Δm_{conv} para pesas patrón, para las diferencias de temperatura ΔT que aparecen en las tablas F1.2 y F1.3. Estos están basados en experimentos realizados en un comparador de masa con mesa giratoria para el intercambio automático de pesas dentro de un corta aires de vidrio. Siendo diferentes las condiciones prevalecientes durante la calibración de los instrumentos para pesar “normales”, los valores en las tablas se deberían considerar como estimaciones de los efectos que se pueden esperar en la calibración normal. Referencias en [6]: fórmula (34), y parámetros para el caso 3d en la Tabla 4

Tabla F2.1 Cambio en la masa aparente Δm_{conv}

Cambio Δm_{conv} en mg para pesas patrón, para diferencias de temperatura seleccionadas ΔT									
		$\Delta T / K$							
m	en	20	15	10	7	5	3	2	1
kg									
50		113,2	87,06	60,23	43,65	32,27	20,47	14,30	7,79
	3								

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

APÉNDICE G EJEMPLOS

Los ejemplos presentados en este Apéndice demuestran diferentes maneras de como se pueden aplicar correctamente las reglas contenidas en esta guía. No se pretende indicar preferencia de un procedimiento contra otro cuyo ejemplo no es presentado.

Si un laboratorio de calibración desea proceder en conformidad completa con uno de estos ejemplos se puede referir en su manual de calidad y en cualquier certificado entregado.

Nota 1:

El certificado debería contener toda la información presentada en Gn.1, tanto como sea conocida, y, si es aplicable, por lo menos lo que se ha impreso en negrita en Gn.2 y Gn.3, con Gn = G1, G2...

Nota 2:

Para referencias a secciones relevantes de la guía vea el Apéndice D2.

G1 Instrumento con capacidad de 200 g, división de escala de 0,1 mg

G1.1 Condiciones específicas para la calibración

Instrumento:	instrumento para pesar electrónico, descripción y identificación
<i>Max/d</i>	200 g / 0,1 mg
Coeficiente de temperatura	$TC \leq 1,5 \times 10^{-6} / K$ (manual del fabricante)
dispositivo de ajuste integrado	reacciona automáticamente : al encenderse, y si $\Delta T \geq 3 K$
ajuste por el calibrador	realizado antes de la calibración
Temperatura durante la calibración	20,2 °C hasta 20,6 °C
condiciones del cuarto	temperatura estabilizada a $21 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$; $h \approx 300 \text{ m}$
receptor de carga	diámetro 80 mm
Cargas de prueba	pesas patrón, clase E₂

G1.2 Pruebas y resultados

Repetibilidad (asumida como constante durante el alcance de pesada)	carga de prueba 100 g, aplicada 6 veces , la indicación sin carga se ajustó a cero cuando fue necesario; lecturas registradas: 100,000 2 g; 99,999 9 g; 100,000 1 g; 100,000 0 g; 100,000 2 g; 100,000 2 g
---	---

Errores de indicación	cada carga de prueba se aplicó una vez; se cargó de manera discontinua sólo hacia arriba, la indicación sin carga se regresó a cero cuando fue necesario; todas las cargas en el centro del receptor de carga. Indicaciones registradas:	
	carga/g	indicación/g
	30	30,000 1
	60	60,000 3
	100	100,000 4
	150	150,000 6
	200	200,000 9

Prueba de excentricidad	carga de prueba 100 g; la indicación sin carga se regresó a cero cuando fue necesario; posiciones/lecturas en g:
	1/100,000 5; 2/100,000 3; 3/100,000 4; 4/100,000 6; 5/100,000 4 $ AI_{ecc} _{max} = 0,2 \text{ mg}$

G1.3 Errores e incertidumbres relacionadas

Los cálculos siguen 7.1 hasta 7.3

Magnitud o Influencia	Carga, indicación en g Incertidumbre estándar en mg					distribución / grados de libertad
Indicación $I \approx m_N / g$	30	60	100	150	200	
Error E_{cal} / mg	0,1	0,3	0,4	0,6	0,9	
Repetibilidad s	0,13 mg					norm/5
Resolución $d_0 / \sqrt{12}$	0,03 mg					rect/100 ¹¹
Resolución $d_1 / \sqrt{12}$	0,03 mg					rect/100
Excentricidad $\hat{w}_{ecc}(I)$	no relevante en este caso					rect/100
$u(I)$	0,14 mg					
Cargas de prueba m_N / g ¹²	10 + 20	10 + 50	100	50 + 100	200	
$u(\delta m_c) = mpe / \sqrt{3}$	0,08	0,09	0,09	0,15	0,17	rect/100
$u(\delta m_D) = mpe / (3\sqrt{3})$	0,03	0,03	0,03	0,05	0,06	rect/100
$\hat{w}(m_B)m_N = mpe / (4\sqrt{3})$	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	rect/100

¹¹ Se asumieron 100 grados de libertad para todas las incertidumbres tipo B, $\Delta u(x_i) / u(x_i) \approx 0,0707$ [2]

¹² Clase E₂, calibrados hace 3 meses, deriva media registrada durante más de 2 calibraciones en 12 meses

$|D_{mc}| \leq mpe / 3$; usados con el valor nominal; temperatura ambiente acondicionada, $\Delta T < 1 \text{ K}$

$u(\delta m_{conv})$	no relevante en este caso					
Inc. del error $u(E)$	0,165	0,170	0,170	0,215	0,232	
ν_{eff}	12	14	14	34	44	
k (95,45 %)	2,23	2,20	2,20	2,08	2,06	
$U(E) = ku(E) / \text{mg}$	0,37	0,37	0,37	0,45	0,48	
adicional, opcional						
Aproximación por línea recta que cruza en cero / mg	$E_{appr}(R) = 4,27 \times 10^{-6} R$					
Incertidumbre de los errores aproximados, $u(E_{appr}) / \text{mg}$	$u(E_{appr}) = \sqrt{(3,25 \times 10^{-13} \text{mg}^2 + 5,8 \times 10^{-13} R^2)}^{13}$					
Incertidumbre expandida $U(E_{appr}) / \text{mg}$	$U(E_{appr}) = 2\sqrt{(5,8 \times 10^{-13} R^2)}$ $= 1,5 \times 10^{-6} R$					

Debe aceptarse y mencionarse en el informe o certificado de calibración, el valor mayor de la incertidumbre expandida para todos los errores declarados: $U(E) = 0,48 \text{ mg}$, basados en $k = 2,06$ para $\nu_{eff} = 44$, acompañado por el comentario que la cobertura de probabilidad es por lo menos al 95 %.

El informe o certificado de calibración puede advertir al usuario de que la incertidumbre estándar del error de cualquier lectura R , obtenida después de la calibración, se incrementa por la adición de la incertidumbre de la lectura $u(R) = 0,14 \text{ mg}$.

G1.4 Incertidumbre de calibraciones en uso

Como se ha mencionado en 7.4, la siguiente información puede ser desarrollada por el laboratorio de calibración o por el usuario del instrumento. En cualquier caso, no se puede presentar o considerar como parte del certificado de calibración.

G1.4.1 Las condiciones normales de uso del instrumento, asumidas o especificadas por el usuario, pueden incluir

Variación de la temperatura $\pm 1 \text{ K}$

Cargas no siempre centradas cuidadosamente

Operación de la función de ajuste a cero del instrumento

Repeticiones de carga: normal, como durante la calibración

G1.4.2 Tabla de cálculos según 7.4 y 7.5

¹³ !El primer término es insignificante!

Magnitud o Influencia	Indicación en g Error, incertidumbre: relativo o en mg					distribución / grados de libertad
Indicación $I \approx m_N/g$	30	60	100	150	200	
Error E_{cal}/mg	0,1	0,3	0,4	0,6	0,9	
Incertidumbre $u(E)$	0,23 mg					norm/44
Alternativa: citar resultados de la aproximación						
Error E_{appr} / mg	$4,27 \times 10^{-6} R$					
$u(E_{appr}) / mg$	$0,76 \times 10^{-6} R$					
Repetibilidad s_R	0,13 mg					norm/5
Resolución $d_0/\sqrt{12}$	0,03 mg					rect/100
Resolución $d_R/\sqrt{12}$	0,03 mg					rect/100
Ajuste de la deriva $\hat{w}(R_{adj})$	no relevante en este caso, debido a que el instrumento se ajusta regularmente					
Temperatura $\hat{w}(R_{temp})$	$0,87 \times 10^{-6}$					rect/100
Procedimiento de pesada: $\hat{w}(R_{ecc})$	$1,15 \times 10^{-6}$					rect/100
$\hat{w}(R_{tare})$	$1,23 \times 10^{-6}$					rect/100
$\hat{w}(R_{time})$	no relevante en este caso					
Incertidumbre del resultado de pesada $u(W)$	$u(W) = \sqrt{(0,0178mg^2 + 4,0 \times 10^{-12} R^2)}$					
ν_{eff}	> 30					
$k(\approx 95\%)$	2					
Incertidumbre del resultado de pesada con corrección por - E_{appr}						
$U(W) = ku(W)$	$U(W) = 2\sqrt{0,0178 mg^2 + 4,0 \times 10^{-12} R^2}$					
simplificado al primer orden	$U(W) \approx U(W = 0) + \left\{ \frac{U(W = Max) - U(W = 0)}{Max} \right\} R$ $U(W) \approx 0,27mg + 2,88 \times 10^{-6} R$					
Incertidumbre global del resultado de pesada sin corrección a la lectura						

$U_{gt}(W) = U(W) + E_{appr}(R) $	$U_{gt}(W) = 0,27 \text{ mg} + 7,15 \times 10^{-6} R$	
------------------------------------	---	--

G1.4.3 Como adjunto al certificado se podría colocar el siguiente comentario:

“Bajo condiciones normales de uso, incluyendo

- temperatura ambiente variando dentro de $\pm 1 \text{ K}$,
- cargas aplicadas sin el cuidado especial al colocarlas al centro de gravedad del receptor de carga,
- obteniendo lecturas R con o sin ajustar a cero la balanza (Valores Netos o Brutos),
- activando el ajuste automático del instrumento,
- sin aplicar corrección alguna a las lecturas R ,

el resultado de pesada W es

$$W = R \pm (0,27 \text{ mg} + 7,1 \times 10^{-6} R)$$

a un nivel de confianza mayor que el 95 %”

Una alternativa podría ser:

(Condiciones como en el anterior comentario)..”, el resultado de pesada W es
dentro de una tolerancia de 1 % para $R \geq 30 \text{ mg}$,
dentro de una tolerancia de 0,1 % para $R \geq 280 \text{ mg}$,

a un nivel de confianza de mayor del 95 %”

G2 Instrumento con capacidad de 60 kg, multi-intervalo

G2.1 Condiciones específicas para la calibración

Instrumento:	instrumento para pesar electrónico, descripción e identificación , con autorización de modelo acorde a OIML R 76, pero no verificado
Max/d	instrumento de multi-intervalo, 3 alcances de pesada parciales: $Max_i/kg = 12/30/60$; $d_i/g = 2/5/10$
Receptor de carga	plataforma 60 cm × 40 cm
Instalación	en taller de empaquetado; $17\text{ °C} \leq t \leq 27\text{ °C}$ reportado por el cliente
Coeficiente de temperatura	$TC \leq 2 \times 10^{-6}/K$ (manual del fabricante)
dispositivo de ajuste integrado	no existente; $ E(Max) \leq 10\text{ g}$ (manual del fabricante)
Última calibración	realizada hace 1 año; el $E(Max)$ fue 7 g
Temperatura durante la calibración	22,3 °C hasta 23,1 °C
Presión barométrica durante la calibración:	1 002 hPa ± 5 hPa
Cargas de prueba	pesas patrón , acero inoxidable, certificadas a clase M ₁ tolerancias de 50 mg/kg (OIML R111-1)

G2.2 Pruebas y resultados

Repetibilidad (asumida como constante durante el alcance de pesada 1)	carga de prueba 10 kg, aplicada 5 veces , indicación sin carga se ajustó a cero cuando fue necesario. Lecturas registradas: 9,998 kg; 10,000 kg; 9,998 kg; 10,000 kg; 10,000 kg	
Repetibilidad (asumida como constante durante los alcances de pesada 2 y 3)	carga de prueba 30 kg, aplicada 5 veces , indicación sin carga se regresó a cero cuando fue necesario. Lecturas registradas: 29,995 kg; 30,000 kg; 29,995 kg; 29,995 kg; 30,000 kg	
Errores de indicación	cada carga de prueba se aplicó una vez; carga discontinua sólo de manera ascendente, la indicación sin carga se ajustó a cero cuando fue necesario; todas las cargas se colocaron al centro del receptor de carga. Indicaciones registradas:	
	Carga / kg	Indicación / kg
	sin carga de tara	

	10	10,000
	25	24,995
	40	39,990
	60	59,990
	25 kg puesto en receptor de carga, indicación puesto a Neto cero por operación de ajuste a cero	
	10	9,998
	20	19,995
Prueba de excentricidad	carga de prueba 20 kg; la indicación sin carga se ajustó a cero cuando fue necesario; posiciones/ lecturas:	
	1: 19,995 kg; 2: 19,995 kg; 3: 19,995 kg 4: 19,990 kg; 5: 19,990 kg; $ \Delta I_{ecc} _{\max} = 5 \text{ g}$	

G2.3 Errores e incertidumbres relacionadas

Los cálculos siguen 7.1 hasta 7.3

Magnitud o Influencia	Carga, indicación en kg Incertidumbre estándar en g, o su valor relativo						distribución / grados de libertad
Indicación $I \approx m_N / \text{kg}$	10	25	40	60			
Error E_{cal} / kg	0	-0,005	-0,010	-0,010			
Indicación I_{Net} / kg	después de tarar la balanza a una precarga de 25 kg				10	20	
Error $E_{Cal,Net} / \text{kg}$					-0,002	-0,005	
Repetibilidad s / g	1,10	2,74			1,10	2,74	norm/4
Resolución $d_0 / \sqrt{12}$	0,58						rect/100
Resolución $d_1 / \sqrt{12}$	0,58	1,44	2,89	2,89	0,58	1,44	rect/100
Excentricidad $\hat{w}_{ecc}(I)$	No relevante para este caso						
$u(I) / \text{g}$	1,37	3,15	4,02	4,02	1,37	3,15	
Cargas de prueba ¹⁴ / kg	10	20+5	2x20	3x20	(25+) 10	(25+) 20	
$u(\delta m_c) = mpe / \sqrt{3}$	0,29	0,72	1,15	1,73	0,29	0,58	rect/100
$u(\delta m_D) = mpe / (2\sqrt{3})$	0,14	0,36	0,58	0,87	0,14	0,29	rect/100

¹⁴ Clase M₁, calibrados hace 8 meses, deriva media registrada durante más de 2 calibraciones en mas de 12 meses $|D_{mc}| \leq mpe/2$; usados con el valor nominal; temperatura ambiente bien acondicionada, $\Delta T < 1 \text{ K}$

$u(\delta m_B) = \hat{w}(m_B) m_N$ $= (2,6 \text{ mg/kg}) m_N^{15}$	insignificante					
$u(\delta m_{conv}) / \text{g}$	insignificante					
Inc. del error $u(E)$	1,41	3,25	4,22	4,46	1,41	3,22
v_{eff}	10	7	21	26	10	7
k (95,45 %)	2,28	2,43	2,13	2,10	2,28	2,43
$U(E) = ku(E) / \text{g}$	3,2	7,9	9,0	9,4	3,2	7,8
Aproximación, realizada con 4 indicaciones netas						
Aproximación por línea recta que cruza en cero / kg	$E_{appr}(R) = -1,69 \times 10^{-4} R$					
Incertidumbre de los errores aproximados, $u(E_{appr})$, para intervalos parciales de pesada (PWR)	PWR 1	$u(E_{appr}) = \sqrt{(5,4 \times 10^{-8} \text{ g}^2 + 2,63 \times 10^{-9} R^2)^{16}}$				
	PWR 2	$u(E_{appr}) = \sqrt{(2,8 \times 10^{-7} \text{ g}^2 + 2,63 \times 10^{-9} R^2)}$				
	PWR 3	$u(E_{appr}) = \sqrt{(4,7 \times 10^{-7} \text{ g}^2 + 2,63 \times 10^{-9} R^2)}$				
$u(E_{appr})$, para los intervalos parciales de pesada (PWR) 1 a 3	$u(E_{appr}) = 5,13 \times 10^{-5} R$					
Incertidumbre expandida, con $k=2$	$U(E_{appr}) = 2u(E_{appr}) = 10,3 \times 10^{-5} R$					
Para facilitar la comparación las aproximaciones se repiten con las 6 indicaciones						
Aproximación por línea recta que cruza en cero / kg	$E_{appr}(R) = -1,79 \times 10^{-4} R$					
$u(E_{appr})$, para los intervalos parciales de pesada (PWR) 1 a 3 / g	$u(E_{appr}) = 4,62 \times 10^{-5} R$					
Incertidumbre expandida, con $k=2$ / g	$U(E_{appr}) = 2u(E_{appr}) = 9,2 \times 10^{-5} R$					
En <i>Max</i> , la primera aproximación resulta $E = -10,2 \text{ g}$, $U(E_{appr}) = 6,2 \text{ g}$; la segunda aproximación resulta $E = -10,8 \text{ g}$, $U(E_{appr}) = 5,5 \text{ g}$: Las diferencias no son significantes. vea G2.5.1						

¹⁵ Para $\Delta p = 40 \text{ hPa}$, $\Delta T = 10 \text{ K}$, $u(\rho_a) = 0,0207 \text{ kg/m}^3$ (de la tabla A3.1).

Con $\rho = (7950 \pm 70) \text{ kg/m}^3$, (7.1.2-7) resulta $\hat{w}(m_B) = 2,6 \text{ mg/kg}$

¹⁶ El primer término es despreciable para los tres intervalos parciales de pesada (PWR)

Debe aceptarse y mencionarse en el informe o certificado de calibración, el valor mayor de la incertidumbre expandida para todos los errores declarados: $U(E) = 4,2$ g, con $k = 2,1$ para $v_{eff} = 28$, acompañado del comentario de que la probabilidad de cobertura es mayor al 95 %.

El informe o certificado de calibración puede advertir al usuario de que la incertidumbre estándar del error de cualquier lectura R , obtenida después de la calibración, se incrementa por la adición de la incertidumbre estándar de la lectura $u(R)$ dependiendo de la división de escala:

de 0 hasta 12 kg: $d = 2$ g, $u(R) = 1,4$ g
 de 12 hasta 30 kg: $d = 5$ g, $u(R) = 3,2$ g
 de 30 hasta 60 kg: $d = 10$ g, $u(R) = 4,0$ g

Para los puntos de prueba mencionados anteriormente, las incertidumbres $U(W^*)$ de los resultados de pesada bajo las condiciones de la calibración: $W^* = R - E$, son por lo tanto

Lectura R /kg	10	25	40	60
Incertidumbre $U(W^*)$ /g	3,9	9,1	11,7	12,0

G2.4 Incertidumbre de las indicaciones en uso

Como se ha mencionado en 7.4, la siguiente información puede ser desarrollada por el laboratorio de calibración o por el usuario del instrumento. En todo caso no se puede presentar, ni considerar como parte del informe o certificado de calibración.

G2.4.1 Las condiciones normales de uso del instrumento, ya sea asumidas, o especificadas por el usuario, pueden incluir

- Variación de temperatura ± 5 K
- Cargas no siempre centradas cuidadosamente
- Operando la función de ajuste a cero de la balanza
- Repeticiones de carga: tanto normalmente, como durante la calibración

G2.4.2 Tabla de cálculos según 7.4 y 7.5

Magnitud o Influencia	Carga, indicación, error en kg Incertidumbre estándar en g, o como valor relativo	Distribución / grados de libertad
-----------------------	---	-----------------------------------

Errores de indicación para lecturas en carga bruta o neta	$E_{appr}(R) = -1,79 \times 10^{-4} R$		
Incertidumbre de los errores $u(E_{appr}(R))$	$u(E_{appr}) = 4,62 \times 10^{-5} R$		
Incertidumbre de la lectura $u(R) = u(I)$	<i>PWR 1</i>	<i>PWR 2</i>	<i>PWR 3</i>
	1,37	3,15	4,02
Incertidumbre del error $u(E(R)) = \sqrt{\{u^2(R) + u^2(E_{appr})\}}$	<i>PWR 1</i>	$u(E(R)) = \sqrt{\{1,88 g^2 + 2,13 \times 10^{-9} R^2\}}$	
	<i>PWR 2</i>	$u(E(R)) = \sqrt{\{9,92 g^2 + 2,13 \times 10^{-9} R^2\}}$	
	<i>PWR 3</i>	$u(E(R)) = \sqrt{\{16,16 g^2 + 2,13 \times 10^{-9} R^2\}}$	
Influencias del instrumento			
Deriva de ajuste vea G2.5.2	$\hat{w}(R_{adj}) = 9,6 \times 10^{-5}$		
Temperatura vea G2.5.3	$\hat{w}(R_{temp}) = 5,8 \times 10^{-6}$		
Influencias del procedimiento de pesada			
Carga excéntrica	$\hat{w}(R_{ecc}) = 1,44 \times 10^{-4}$		
Operación del dispositivo de tarar	$\hat{w}(R_{tare})$: Incluido por el procedimiento de calibración		
Repeticiones de carga	No relevante para este caso		
Incertidumbre del resultado de pesada $u(W)$	<i>PWR 1</i>	$u(W) = \sqrt{\{1,88 g^2 + 3,0 \times 10^{-8} R^2\}}$	
	<i>PWR 2</i>	$u(W) = \sqrt{\{9,92 g^2 + 3,0 \times 10^{-8} R^2\}}$	
	<i>PWR 3</i>	$u(W) = \sqrt{\{16,20 g^2 + 3,0 \times 10^{-8} R^2\}}$	
Incertidumbre del resultado de pesada corregido por E_{appr}			
Incertidumbre expandida $U(W) = ku(W)$, $k=2$	<i>PWR 1</i>	$U(W) = 2\sqrt{\{1,88 g^2 + 3,0 \times 10^{-8} R^2\}}$	
	<i>PWR 2</i>	$U(W) = 2\sqrt{\{9,92 g^2 + 3,0 \times 10^{-8} R^2\}}$	
	<i>PWR 3</i>	$U(W) = 2\sqrt{\{16,20 g^2 + 3,0 \times 10^{-8} R^2\}}$	
Simplificada al primer orden: $U(W) \approx U(Max_{i-1}) + \left\{ \frac{[U(Max_i) - U(Max_{i-1})]}{Max_i - Max_{i-1}} \right\} R$	<i>PWR 1</i>	$U(W) \approx 2,7 g + 1,9 \times 10^{-4} R$	
	<i>PWR 2</i>	$U(W) \approx 7,5 g + 3,2 \times 10^{-4} (R - 12 kg)$	
	<i>PWR 3</i>	$U(W) \approx 13,1 g + 3,4 \times 10^{-4} (R - 30kg)$	

Incertidumbre global del resultado de pesada sin la corrección a las lecturas			
$U_{gl}(W) = U(W) + E_{appr}(R) $ también simplificada al primer orden	<i>PWR</i> 1	$U_{gl}(W) \approx 2,7 \text{ g} + 2,82 \times 10^{-4} R$	
	<i>PWR</i> 2	$U_{gl}(W) \approx 7,5 \text{ g} + 4,12 \times 10^{-4} (R - 12 \text{ kg})$	
	<i>PWR</i> 3	$U_{gl}(W) \approx 13,1 \text{ g} + 4,32 \times 10^{-4} (R - 30 \text{ kg})$	

G2.4.3 Un adjunto al certificado podría contener el siguiente comentario:

“Bajo condiciones normales de uso, incluyendo

temperatura del local variando dentro de 17 °C y 27 °C,
cargas aplicadas sin cuidado especial para colocarlas en el
centro de gravedad del receptor de carga,
obtener lecturas R con o sin tarar la balanza (valores netos o
brutos),
no aplicar correcciones a la lectura R ,

el resultado de pesada W es

$$W = R \pm U(W), \text{ con } U(W) \text{ como se indica a continuación}$$

Alcance de pesada	de	Lectura R de hasta:	Incertidumbre $U(W)$ del resultado de pesada W / g
<i>PWR 1</i>		0 12 kg	$\approx 2,7 \text{ g} + 2,82 \times 10^{-4} R$
<i>PWR 2</i>		12 kg 30 kg	$\approx 7,5 \text{ g} + 4,12 \times 10^{-4} (R - 12 \text{ kg})$ $\approx 3 \text{ g} + 4 \times 10^{-4} R$
<i>PWR 3</i>		30 kg 60 kg	$\approx 13,1 \text{ g} + 4,32 \times 10^{-4} (R - 30 \text{ kg})$ $\approx 4,4 \times 10^{-4} R$

a un nivel de confianza mejor que el 95%.”

Una alternativa podría ser:

(Condiciones como antes)..”..., el resultado de pesada W es

dentro una tolerancia de 1 % para $R \geq 0,28 \text{ kg}$,
dentro una tolerancia de 0,5 % para $R \geq 0,57 \text{ kg}$,
dentro una tolerancia de 0,2 % para $R \geq 1,56 \text{ kg}$,
dentro una tolerancia de 0,1 % para $R \geq 3,72 \text{ kg}$

a un nivel de confianza mayor al 95%.”

G2.5 Información adicional al ejemplo

Los instrumentos multi-intervalos tienen división de escala que cambia en el alcance de pesada – vea las especificaciones para Max y d en G2.1 – y estas

divisiones de escala muestran las indicaciones netas después de una operación de tarar la balanza siempre empezando con la menor resolución, de la misma manera como se muestran las indicaciones brutas.

Mediante un esfuerzo razonable, no es posible probar tales instrumentos para errores de indicaciones netas con una gran variedad de cargas tara. Por eso debe considerarse que un instrumento con suficiente linealidad, de la relación $I = f(m)$, la misma carga neta se indicara casi con el mismo error sin importar del valor de la tara equilibrada. La aproximación por una función lineal sin un desplazamiento, por Ej. una función lineal que pase por cero - $l(m=0)=0$ - conforme con (C2.2-16) permite evaluar la linealidad de la relación: con la condición (C2.2-2), el criterio $\min \chi^2$ se satisface por los datos de prueba correspondientes, la aproximación por la función lineal se considera como un método conveniente, lo que significa que los errores individuales son de hecho lo suficientemente cercanos a una línea recta que pasa por cero.

De cualquier manera, se deberían realizar pruebas con una o dos cargas netas aplicadas después de tarar una precarga considerable, para asegurarse de que los errores para cargas netas no están influenciados significativamente por efectos de deriva e histéresis. Mientras los errores para las mismas cargas netas, con precarga o sin precarga, sean semejantes dentro de la desviación estándar de la repetibilidad, se puede suponer que los errores determinados en la calibración de hecho aplican para todas las cargas indicadas, ya sean brutas o netas.

G2.5.1 Comparación de las aproximaciones

Esta comparación demuestra que, en este caso los valores de los errores encontrados en los puntos de prueba 5 y 6 no varían significativamente de los resultados de la aproximación.

Los valores de $\min \chi^2$ obtenidos por la evaluación son

2,08 para ser evaluado contra el valor criterio de **4,9** para la primera aproximación, y
2,33 para ser evaluado contra el valor criterio de **4,9** para la segunda aproximación.

En ambos casos no existe duda de que el modelo de aproximación lineal es consistente con los datos correspondientes de la prueba.

G2.5.2 Como se ha mencionado en G2.1, el error en *Max* fue +7 g al momento de la última calibración y ahora es -10 g. Los dos valores están dentro de la especificación del fabricante para el error en *Max*. Con (7.4.3-2) la incertidumbre relativa para la variación de ajuste es

$$\hat{w}(R_{adj}) = |\Delta E(Max)| / (Max \sqrt{3}) = 9,6 \times 10^{-5}$$

G2.5.3 Como se ha mencionado en G2.1, la temperatura ambiente cerca del instrumento es

de 17 °C hasta 27 °C que lleva a un $\Delta T = 10$ K. El coeficiente de temperatura del instrumento especificado por el fabricante es de $TC \leq 2 \times 10^{-6}/K$: Por lo tanto (7.4.3-1) queda

$$\hat{w}(R_{temp}) = 2 \times 10^{-6} \times 10 / \sqrt{12} = 5,8 \times 10^{-6}$$

G3 Instrumento con capacidad de 30 t, división de escala de 10 kg

G3.1 Condiciones específicas para la calibración

Instrumento:	instrumento para pesar electrónico, descripción e identificación , con aprobación de modelo acorde a OIML R76, pero sin verificación
Max/d	30 t / 10 kg
Receptor de carga	3 m ancho, 10 m largo, 4 puntos de apoyo
Instalación	En el exterior, al aire libre, bajo sombra
Coeficiente de temperatura	$TC \leq 2 \times 10^{-6}/K$ (manual del fabricante)
Dispositivo de ajuste integrado	No instalado
Última calibración	se realizó hace 10 meses; el error en <i>Max</i> fue -5 kg
División de escala para la prueba	Alta resolución (modo de servicio), $d_T = 1$ kg
Duración de la prueba	De 9h00 a 11h00
Temperatura durante la calibración:	17°C hasta 20°C
Presión barométrica durante la calibración:	1 010 hPa \pm 10 hPa
Cargas de prueba	<p>Pesas patrón:</p> <ul style="list-style-type: none"> 12 pesas cilíndricas laminadas, hierro fundido, de 500 kg cada una, certificadas a tolerancia de clase M₁ de <i>mpe</i> = 25 g (OIML R 111-1) <p>Cargas de sustitución hechas de acero o hierro fundido:</p> <ul style="list-style-type: none"> 6 contenedores de acero llenos con acero o hierro fundido suelto, cada uno pesando \approx 3 000 kg; trailer para soportar los contenedores de acero, ajustado a pesar \approx 6 000 kg; Montacargas, pesando \approx 4,5 t, con capacidad para el manejo de 6 t de cargas de sustitución

G3.2 Pruebas y resultados

Repetibilidad (asumidas como constante sobre el alcance de pesada)	Montacargas con 2 contenedores de acero, movidos de forma alternada entre los extremos del receptor de carga, la carga centrada de manera visual; la indicación sin carga se ajustó a cero cuando fue necesario. Carga de prueba $\approx 10,5$ t Lecturas registradas: 10 411 kg; 10 414 kg; 10 418 kg; 10 412 kg; 10 418 kg. Después de descargar, las indicaciones sin cargas fueron entre 0 y 2 kg	
Errores de indicación	Las cargas de prueba fueron hechas por sustitución, con pesas patrón de 6 000 kg y 4 cargas de sustitución de aproximadamente 6 t cada una. Todas las cargas se aplicaron una vez, la carga se realizó de manera discontinua, y sólo ascendente; las indicaciones después de descargar las pesas patrón fueron registradas pero no se aplicó corrección alguna; todas las cargas se colocaron razonablemente al centro del receptor de carga. Indicaciones registradas:	
	Carga L_{Tj} / kg	Indicación I_j / kg
	6 000	6 001
	12 014	12 014
	17 996	17 999
	24 014	24 019
	30 001	30 010
	0	4
	Ver G3.5.1 para el registro completo de los datos	
Prueba de excentricidad	La misma carga de prueba de $\approx 10,5$ t se utilizó para la prueba de repetibilidad, la indicación sin carga se ajustó a cero cuando fue necesario; posiciones/lecturas en kg:	
	1/10 471 kg; 4/ 10 476 kg;	2/10 467 kg; 5/10 475 kg; 3/10 473 kg;
	$ \Delta I_{ecc} _{\max} = 5$ kg	

G3.3 Errores e incertidumbres relacionadas

Los cálculos se realizaron de acuerdo a 7.1 hasta 7.3

Magnitud o Influencia	Carga, indicación, error en kg Incertidumbre estándar en kg, o como valor relativo					distribución / grados de libertad
Indicación $I \approx m_N$ / kg	6 000	12 000	18 000	24 000	30 000	
Error E_{cal} / kg	1	0	3	5	9	
Repetibilidad s / kg	3,3					norm/4

Digitalización $d_{T0}/\sqrt{12}$	0,3					rect
Digitalización $d_{T1}/\sqrt{12}$	0,3					rect
Excentricidad $u(I_{ecc,ind}) = 6,9 \times 10^{-5} I_j$ Fundamento: G3.5.2	0,4	0,8	1,2	1,7	2,1	rect
desplazamiento/histéresis $u(I_{time}) = 7,7 \times 10^{-5} I_j$ Fundamento: G3.5.3	0	0,92	1,39	1,85	2,31	rect.
Incertidumbre de la indicación $u(I)$	3,34	3,54	3,80	4,14	4,54	
Cargas de prueba						
Pesas patrón ¹⁷ m_{c1}	6 000					
$u(\delta m_c) = mpe/\sqrt{3}$	0,173					rect
$u(\delta m_D) = mpe/\sqrt{3}$	0,173					rect
$u(\delta m_B) = 7,2 \times 10^{-6} m_{c1}$ ¹⁸	0,043					rect
$u(m_{c1})$	0,25					triang

Cargas de sustitución $L_{subj} \approx$	0	6 000	12 000	18 000	24 000	
$L_{Tj} = m_{c1} + L_{subj} \approx$	6 000	12 000	18 000	24 000	30 000	
$u(\delta m_B) = 2,9 \times 10^{-6} L_{sub}$ vea G3.5.4	despreciable					
$u(L_{Tj}) = \sqrt{\left\{ \begin{array}{l} j^2 u^2(m_{c1}) \\ + 2 \sum u^2(I_{j-1}) \end{array} \right\}}$	0,25	4,76	6,93	8,80	10,62	triangular hasta normal/>100
Incertidumbre de error $u(E) = \sqrt{u^2(I_j) + u^2(L_{Tj})}$	3,36	5,93	7,90	9,74	11,56	
ν_{eff}	4	35	74	100	113	
k (95,45 %)	2,87	2,07	2,03	2,03	2,02	
$U(E) = ku(E) / \text{kg}$	9,6	12,3	16,0	19,8	23,4	
adicional, opcional:						

¹⁷ Clase M₁, calibrados hace 3 meses, deriva media registrada durante 2 calibraciones $|D_{mc}| \leq mpe$ durante 12 meses; utilizados en valor nominal; acondicionados a temperatura ambiente, $\Delta T < 5 \text{ K}$

¹⁸ Valor de tabla E2.1 para la fundición de hierro gris: $\rho = (7\,100 \pm 300) \text{ kg/m}^3$, $u(\rho_a) = 0,064 \text{ kg/m}^3$, $\hat{w}(m_B) = 7,2 \times 10^{-6}$ (7.1.2-5a)

Resultados de la aproximación por línea recta que cruza por cero / kg	$E_{appr}(R) = 0,00019R$	
Incertidumbre de los errores aproximados / kg	$u(E_{appr}(R)) = \sqrt{(7,3 \times 10^{-7} \text{ kg}^2 + 1,75 \times 10^{-7} R^2)}$ ¹⁹	
Incertidumbre expandida, con $k = 2$ / kg	$U(E_{appr}(R)) = 2u(E_{appr}(R)) = 8,4 \times 10^{-4} R$	

El informe o certificado de calibración debe informar al usuario de que cualquier lectura R obtenida después de la calibración, debe corregirse al restar el error correspondiente E mencionado anteriormente sólo después de redondear a la división de escala d , símbolo E_d , y que la incertidumbre estándar del error de cualquier lectura, debe añadirse al sumar la incertidumbre estándar de la lectura, $u(R) = \sqrt{(2d^2/12 + s^2)} = 5,25 \text{ kg}$.

Vea en G3.5.5 los valores a ser presentados en el certificado.

Debe aceptarse y mencionarse en el informe o certificado de calibración, el valor mayor de la incertidumbre expandida para todos los errores declarados: $U(E) = 23,4 \text{ kg}$, o $U(E_d) = 25 \text{ kg}$ con $k = 2,02$, acompañado por el comentario que la cobertura de probabilidad es por lo menos al 95 %.

G3.4 Incertidumbre de las indicaciones en uso

Como se ha mencionado en 7.4, la siguiente información puede ser desarrollada por el laboratorio de calibración o por el usuario del instrumento. En cualquier caso no se puede presentar ni considerar como parte del informe o certificado de calibración.

- G3.4.1 Las condiciones normales de uso del instrumento, asumidas o especificadas por el usuario, pueden incluir
- Variación de temperatura de -10 °C hasta $+30 \text{ °C}$
 - Cargas no siempre cuidadosamente centradas
 - Operación de la función de tarar del instrumento
 - Repeticiones de carga: de manera normal, que es menor que durante la calibración

G3.4.2 Tabla de cálculos según 7.4 y 7.5

¹⁹ El primer término es despreciable

Magnitud o Influencia	Indicación en kg Incertidumbre estándar, relativa o en kg	distribución/ grados de libertad
Errores determinados por calibración	$E(R) = 0,00019R$	
Incertidumbre estándar $u(E(R))$	$u(E(R)) = \sqrt{\{(5,25 \text{ kg})^2 + 1,75 \times 10^{-7} R^2\}}$	
Contribuciones adicionales a la incertidumbre		
Instrumento para pesar		
Deriva del ajuste: cambio de $E(Max)$ durante 1 año = 15 kg	$\hat{w}(R_{adj}) = 15 / (30000\sqrt{3}) = 2,89 \times 10^{-4}$	rect/100
Temperatura: $\hat{w}(R_{temp}) = TCx \Delta T / \sqrt{12}$	$2 \times 10^{-6} \times 40 / \sqrt{12} = 0,23 \times 10^{-4}$	rect/100
Procedimiento de pesaje		
Excentricidad de carga: $\hat{w}(R_{ecc}) \Delta l _{max} / (L_{ecc} \sqrt{3})$	$5 / (10470\sqrt{3}) = 2,76 \times 10^{-4}$	rect/100
Tarar: la no linealidad de los errores es menor que su incertidumbre estándar!	-----	rect/100
Repeticiones: $u(I_{time})$ aplica para el alcance de pesada completo, vea G3.5.3	$\hat{w}(R_{time}) = 0,77 \times 10^{-4}$	rect/100
Incertidumbre del resultado de pesada $u(W)$	$u(W) = \sqrt{(5,25 \text{ kg})^2 + \left(\begin{array}{l} 17,48 + 8,35 + 0,053 \\ + 7,62 + 0,59 \end{array} \times 10^{-8} R^2 \right)}$ $u(W) = \sqrt{(5,25 \text{ kg})^2 + 3,41 \times 10^{-7} R^2}$	
k ($\approx 95\%$)	2	
Incertidumbre del resultado de pesada corregida por E_{appr}		
$U(W) = ku(W)$	$U(W) = 2\sqrt{(5,25 \text{ kg})^2 + 3,41 \times 10^{-7} R^2}$	
simplificada al primer orden	$U(W) \approx U(W=0) + \left\{ \left[\begin{array}{l} U(W=Max) \\ -U(W=0) \end{array} \right] / Max \right\} R$ $U(W) \approx 10,5 \text{ kg} + 8,69 \times 10^{-4} R$	
Incertidumbre global para resultado de pesada sin corrección a la lectura		

$U_{gl}(W) = U(W) + E_{appr}(R) $	$U_{gl}(W) = 10,5 \text{ kg} + 1,06 \times 10^{-3} R$	
------------------------------------	---	--

G3.4.3 Un adjunto al certificado puede contener el siguiente comentario:

“Bajo condiciones normales de uso, incluyendo temperatura ambiente variando entre $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ y $+30 \text{ }^\circ\text{C}$, cargas aplicadas sin cuidados especiales para colocarlas en el centro de gravedad del receptor de carga, obteniendo lecturas R con o sin tarar (valores neto o bruto), sin aplicar corrección alguna a las lecturas R ,

el resultado de pesada W es

$$W = R \pm (10,5 \text{ kg} + 1,06 \times 10^{-3} R)$$

a un nivel de confianza mayor al 95%.”

Una alternativa podría ser:

(Condiciones como antes).”,

el resultado de pesada W esta

dentro de una tolerancia de 1 %	para $R \geq 1\ 200 \text{ kg}$,
dentro de una tolerancia de 0,5 %	para $R \geq 2\ 800 \text{ kg}$,
dentro de una tolerancia de 0,2%	para $R \geq 13\ 930 \text{ kg}$,

a un nivel de confianza mayor que 95%.”

G3.5 Información adicional para el ejemplo

G3.5.1 Detalles del procedimiento de sustitución; referencia: 4.3.3

Para las pruebas de calibración con sustitución de carga, cada carga de sustitución ha sido ajustada al añadir o sustraer partes de maquinaria para lograr diferencias de $\Delta I_j \leq 20 \text{ kg}$ (ahorra tiempo comparado con el ajuste a $\Delta I \leq 1 \text{ kg}$). Todas las indicaciones en alta resolución $d_T = 1 \text{ kg}$.

En el paso 1, el trailer vacío se ha usado como carga de sustitución; en los pasos del 2 hasta el 4, en cada ocasión se han colocado en el trailer 2 contenedores de acero.

Todos los datos que han sido registrados se presentaran por completo posteriormente. Consistente con 4.3.3, los símbolos son

L_{Tj} carga de prueba en paso j , hecho de $m_{c1} = 6\ 000 \text{ kg}$ de pesas patrones más la carga de sustitución acumulada L_{Tj-1}

$E_j = I_j - L_{Tj}$

I'_j es la indicación después de quitar m_{c1}

$I(L_{subj})$ es la indicación después de añadir $\approx 6\ 000$ kg en carga de sustitución
 $\Delta I_j = I(L_{subj}) - I_j$
 $L_{subj} = L_{Tj} + \Delta I_j$, valor de la carga de sustitución

Paso j	L_{Tj} kg	I_j kg	E_j kg	I'_j kg	$I(L_{subj})$ kg	ΔI_j kg	L_{subj} kg
0	0	0	0				
1	6 000	6 001	1	1	6 015	14	6 014
2	12 014	12 014	0	6 016	11 996	-18	11 996
3	17 996	17 999	3	12 001	18 017	18	18 014
4	24 014	24 019	5	18 022	24 006	-13	24 001
5	30 001	30 010	9	---		---	

Después de quitar todas las cargas de prueba, se registró una indicación estable de 4 kg.

En G3.3, todas las indicaciones están citadas como valores nominales, conforme con 6.2.1.

G3.5.2 Excentricidad de las cargas de prueba

Posiciones de la carga para la prueba de excentricidad: las distancias del centro del receptor de carga fueron de 2,50 m de largo y de 0,75 m de ancho, como posiciones de carga normales de esta prueba.

Las cargas para las pruebas de indicación fueron centradas visualmente con cuidado, se observó como distancia mayor en longitud 1 m y en lo ancho 0,4 m. Por lo tanto, la excentricidad para esas cargas no ha sido mayor que la mitad de las distancias de la prueba de excentricidad.

Por lo tanto, la incertidumbre estándar relativa para la excentricidad en las pruebas de indicación es

$$\hat{w}(I_{ecc,ind}) = |\Delta I_{ecc}|_{\max} / (2L_{ecc} \sqrt{12})$$

G3.5.3 Efectos de deriva e histéresis

Para todos los pasos de carga con las cargas de sustitución se debería considerar una incertidumbre adicional debido al hecho de que el procedimiento incluye una parte de carga y una de descarga y que se necesita un mayor tiempo para el ajuste de cada carga de sustitución acumulada.

Para la deriva y la histéresis se puede derivar una contribución de la indicación E_0 en el regreso a cero carga, conforme con 7.4.4.2.

La expresión (7.4.4-7): $\hat{w}(I_{time}) = E_0 / (Max \sqrt{3})$

da un valor de

$$\hat{w}(I_{time}) = 4 / (30000 \sqrt{3}) = 7,7 \times 10^{-5}$$

la cual debe añadirse a la incertidumbre de la indicación de todas las cargas, exceptuando la primera carga de 6 000 kg la cual consiste solo de pesas patrones.

Las mismas incertidumbres se añaden a las indicaciones en uso, porque el tiempo de carga en uso normal se espera sea muy corto, así que es diferente al tiempo empleado en la calibración.

G3.5.4 Corrección del empuje de aire para las cargas de sustitución

Las cargas de sustitución fueron un trailer y contenedores de acero llenos con partes de maquinaria (acero a hierro fundido).

Para la densidad de los contenedores llenos, se asume un valor de densidad $\rho = (7\ 500 \pm 400)$ kg/m³ (basado en la información dada en el Apéndice E).

Para el trailer, por simplicidad, se puede asumir la misma densidad (fabricados principalmente de acero, excepto las ruedas y algunas partes de los frenos).

Durante la calibración la temperatura de aire t cambió de 17 °C a 20 °C, y la presión atmosférica fue $p = (1\ 010 \pm 10)$ hPa.

Aplicando la expresión (A1.1-1) en la cuál despreciamos el término de humedad relativa, encontramos los valores extremos

$$\rho_{a,\min} = 0,34848 p_{\min} / (273,15 + t_{\max}) = 1,188\ 9\ \text{kg/m}^3$$

$$\rho_{a,\max} = 0,34848 p_{\max} / (273,15 + t_{\min}) = 1,225\ 1\ \text{kg/m}^3$$

con una diferencia de $\Delta\rho_a = 0,036\ 2\ \text{kg/m}^3$

el cambio máximo del empuje de aire de las cargas de sustitución por lo tanto es

$$\Delta m_{sub,B} \approx L_{sub} \Delta\rho_a / \rho = 24\ 000 \times 0,036\ 2 / 7\ 500 = 0,12\ \text{kg}$$

dando una incertidumbre relativa de

$$\hat{w}(\delta m_{sub,B}) = \Delta m_{sub,B} / (L_{sub} \sqrt{3}) = 2,9 \times 10^{-6}$$

que de hecho se puede despreciar.

G3.5.5 Resultados de pesada bajo las condiciones de la calibración

Los resultados de pesada bajo las condiciones de la calibración $W^* = R - E$ obtenidos después de la calibración para los puntos de prueba que fueron determinados, son los siguientes

Lectura R / kg	6 000	12 000	18 000	24 000	30 000	
Errores redondeados a d / kg	0	0	0	10	10	
$u(R)$ / kg	5,25					
$u(W^*) = \sqrt{u^2(R) + u^2(E)}$ / kg	6,23	7,92	9,49	11,06	12,70	
ν_{eff}	38	91	133	153	157	
k (95,45%)	2,07	2,03	2,02	2,02	2,02	
$U(W^*) = ku(W^*)$ / kg	12,9	16,1	19,2	22,3	25,6	
Resultado de la aproximación por línea recta que cruza por cero / kg	$E_{appr}(R) = 0,00019R$					
Incertidumbre de W^* / kg	$u(W^*) = 10,5 \text{ kg} + 5,29 \times 10^{-4} R$					
Incertidumbre expandida, con $k = 2$ / kg	$U(W^*) = 2u(W^*)$					