European co-operation for Accreditation

Publicación de Referencia

EA-10/18

Guía para la calibración de los instrumentos para pesar de funcionamiento no automático

OBJETIVO

Este documento ha sido desarrollado para armonizar la calibración de los instrumentos para pesar de funcionamiento no automático. Además ofrece guías a las entidades nacionales de acreditación acerca de los requerimientos mínimos para la calibración de los instrumentos para pesar de funcionamiento no automático, y por otro lado, establece procedimientos prácticos para los laboratorios de calibración.
El documento contiene ejemplos detallados de la estimación de la incertidumbre de las mediciones.

Sobre el autor
Esta publicación ha sido preparado por el Comité de Laboratorios de la EA basándose en un borrador del Grupo de Trabajo “Ad hoc” de Mediciones Mecánicas.

Lenguaje oficial
El texto puede ser traducido a otros idiomas si es necesario. La versión en el idioma ingles permanecerá como la versión definitiva.

Recomendación para las publicaciones
Este documento representa un consenso de las opiniones de los miembros de la EA y su práctica preferida sobre la aplicación de las cláusulas relevantes de las normas de acreditación en el contexto del tema de este documento. Las propuestas presentadas no son obligatorias, son una guía para las entidades de acreditamiento y sus laboratorios acreditados. Sin embargo, el documento ha sido escrito como medio para promover una aproximación consistente entre la acreditación del laboratorio y la entidad miembro de la EA, en especial a aquellos participantes del Acuerdo Multilateral de la EA.

Información adicional
Para mayor información acerca de esta publicación, Ud. puede contactar al miembro nacional de la EA o al presidente del Laboratorio Comisionado de la EA, correo electrónico: hanspeter.ischi@metas.ch
Para información reciente revise nuestra página de Internet:
http://www.european-accreditation.org

Categoría: 4

Fecha de entrada en vigor: 15.09.2004

Fecha de implementación: 01.01.2005

Período de transición: -

NOTA
Los derechos de autor del presente documento han sido transferidos de la EA (*European co-operation for Acreditation*) a EUROMET (*European Collaboration in Measurement Standards*).
Esta versión del documento EA-10/18 en español ha sido autorizada por EUROMET para ser difundida dentro del Sistema Interamericano de Metrología (SIM) como documento de trabajo para la elaboración de la Guía SIM para la calibración de instrumentos para pesar de funcionamiento no automático.

La traducción al español del documento fue realizado por Luis Omar Becerra y Janet Lindenman del CENAM México.

CONTENIDO

APÉNDICES

(Informativo)

1 INTRODUCCIÓN

Los instrumentos para pesar de funcionamiento no automático son ampliamente utilizados para determinar la magnitud de una carga en términos de su masa. Mientras que para algunas aplicaciones especificadas por legislaciones nacionales, los instrumentos son sometidos a control metrológico legal, p.e. aprobación de modelo, verificación, etc., existe una creciente necesidad de tener la calidad metrológica certificada por calibración, p.e. como es requerido por las normas ISO 9001 o ISO/IEC 17025.

2 ALCANCE

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

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

El objeto de la calibración es la indicación proporcionada por el instrumento en respuesta a una carga aplicada. Los resultados están expresados en unidades de masa. El valor de la carga indicada por el instrumento para pesar es afectado por la fuerza debida a la gravedad, la temperatura y densidad de la carga, y la temperatura y densidad del aire ambiental.

La incertidumbre de la medición depende significativamente de las propiedades del mismo instrumento para pesar a ser calibrado, no únicamente del equipo del laboratorio de calibración; ésta puede reducirse, en cierta medida, al incrementar el número de mediciones realizadas para la calibración. Esta guía no especifica límites superiores o inferiores para la incertidumbre de la medición.
Es decisión del laboratorio de calibración y del cliente el ponerse de acuerdo previo a la calibración sobre el valor de incertidumbre de la medición apropiado para el uso del instrumento para pesar así como del costo de la calibración.

El objetivo de esta Guía no es presentar uno o varios procedimientos uniformes cuyo uso sea obligatorio; este documento proporciona recomendaciones generales para el establecimiento de los procedimientos de calibración. Los resultados de los mismos pueden ser considerados equivalentes dentro de las organizaciones miembros de la EA.

Cualquiera de estos procedimientos debe incluir, para un número determinado de cargas, la determinación de los errores de indicación y la incertidumbre de medición asociada a los mismos. El procedimiento de prueba deberá asemejarse tanto como sea posible a las operaciones de pesada habituales del usuario, p. ej. pesar cargas discretas, pesar aumentando y disminuyendo la carga, usar la función de ajuste a cero (tarar).

El procedimiento puede incluir reglas adicionales de cómo obtener a partir de los resultados, recomendaciones para el usuario del instrumento para pesar respecto a los errores, a la incertidumbre de la medición, a las indicaciones que podrían ocurrir bajo condiciones normales de uso del instrumento para pesar, y/o reglas de cómo convertir una indicación obtenida para un objeto pesado en un valor de masa convencional o en un valor de masa de dicho objeto.

La intención de la información presentada en esta guía es ser utilizada por, y debería ser observada por:

1. las entidades de acreditación de laboratorios para la calibración de instrumentos para pesar,
2. laboratorios acreditados para la calibración de instrumentos para pesar de funcionamiento no automático,
3. laboratorios de prueba, laboratorios o fabricantes que utilicen instrumentos para pesar de funcionamiento no automáticos calibrados utilizados par realizar mediciones relevantes para la calidad de la producción que afecte los requisitos del Sistema de Calidad (p. ej. ISO 9000 serie, ISO 10012, ISO/IEC 17025)

Un resumen de los principales términos y ecuaciones utilizados en este documento se encuentran en el apéndice D2.

3 TERMINOLOGÍA Y SÍMBOLOS

La terminología empleada en este documento está basada principalmente en los siguientes documentos:

- EA-4/02 [2] para los términos relacionados con la determinación de los resultados y la incertidumbre de la medición,
- OIML R111 [3] para los términos relacionados con las pesas patrón,
- EN 45501 [4] para los términos relacionados con el funcionamiento, la construcción y la caracterización metrológica de los instrumentos para pesar de funcionamiento no automáticos.
  - Nota: Términos de EN 45501 son idénticos con OIML R 76 [6]
- VIM [10] para los términos relacionados con la calibración.

Los términos que no son explicados en este documento, se indicaran las referencias en el lugar donde aparecen por primera vez.

Los símbolos cuyo significado no se explique por sí mismo, se explicarán donde se utilicen por primera vez. 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 la calibración

La calibración consiste en

1. la aplicación de cargas de prueba al instrumento para pesar bajo condiciones especificadas,
2. la determinación del error o variación de la indicación, y
3. la estimación de la incertidumbre de la medición a ser atribuida a los resultados.

4.1.1 Alcance de la calibración

A menos que el cliente lo requiere de otra manera, una calibración cubre el alcance de pesada completo [4], desde cero hasta la capacidad máxima Max. El cliente puede especificar una parte especial del alcance de pesada, limitado por una carga mínima Min' y la carga mayor a ser pesada Max', o cargas individuales nominales para las cuales requiere calibración.

Con un instrumento para pesar de varios intervalos de medición [4], el cliente debería identificar que intervalo(s) se debería(n) calibrar. El párrafo anterior aplica a cada alcance por separado.

4.1.2 Lugar de calibración

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

Sí un instrumento para pesar se cambia a otro lugar después de la calibración, posibles efectos debidos a

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

pueden alterar muy probablemente el funcionamiento del instrumento y posiblemente invalidar la calibración. Por este motivo el movimiento del instrumento después de la calibración se debe evitar si no se ha demostrado la inmunidad a estos efectos en el instrumento para pesar en particular, o para ese tipo de instrumentos. Si eso no ha sido demostrado no se debería aceptar el certificado de calibración como prueba de trazabilidad.

4.1.3 Condiciones previas, preparaciones

La calibración no debería realizarse a menos que

1. el instrumento para pesar pueda ser claramente identificado,
2. todas las funciones del instrumento para pesar están libres de los efectos de contaminación o daño y las funciones esenciales necesarias para la calibración funcionen según su propósito,
3. la presentación de los valores de pesada es inequívoco y las indicaciones, si existen, se puedan leer fácilmente,
4. la condiciones normales de uso (flujo de aire, vibraciones, estabilidad

del lugar de pesada, etc.) son apropiados para el instrumento para pesar que se calibrará,

5. el instrumento se enciende un período antes de la calibración, p. ej. el tiempo especificado para que se caliente el instrumento, o como este establecido por el usuario,
6. si aplica, el instrumento este nivelado,
7. el instrumento ha sido ejercitado al colocar una carga cercana al alcance máximo al menos una vez, se recomienda repetir varias pesadas.

Los instrumentos para pesar que se tienen que ajustar regularmente antes de usarlos se deben ajustar antes de la calibración, a menos de que se acuerde lo contrario con el cliente. El ajuste se debería realizar con los medios normalmente aplicados por el cliente y siguiendo las instrucciones del fabricante, cuando estén disponibles.

Tanto como sea relevante para los resultados de la calibración, se debe anotar el estado de los ajustes del programa de cómputo (*software*), los cuales podrían ser alterados por el cliente.

Los instrumentos para pesar equipados con la función ajuste automático a cero o un dispositivo de indicación a cero [4] se deberían calibrar con el dispositivo operando ó apagado, según lo determine el cliente.

Para una calibración "*in situ*" se debería pedir al usuario del instrumento que asegure que prevalecen las condiciones normales de uso durante la calibración. De esta manera efectos que interfieren como flujos de aire, vibraciones o la inclinación de la plataforma para medir pueden, tanto como sea posible, ser intrínsecos a los valores medidos y por lo tanto puedan ser incluidos 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 al receptor de la carga:

$$I \sim mg(1-\rho_a/\rho) \qquad (4.2.2\text{-}1)$$

con g aceleración de gravedad local

ρ_a densidad del aire ambiente

ρ densidad del objeto

El término en paréntesis considera la disminución de la fuerza debida al empuje del aire sobre el objeto.

4.2.2 El efecto del empuje del aire

Es el estado del arte utilizar pesas patrón que han sido calibradas en valor de masa convencional m_c [1], para el ajuste y/o la calibración de los instrumentos para pesar. El ajuste se realiza tal que los efectos de g y del empuje del aire de la pesa patrón m_{cs} estén incluidos en el factor de ajuste. Por eso, en el momento del ajuste la indicación I_s es

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

Por supuesto, este ajuste se realiza bajo condiciones caracterizadas por los valores correspondientes de g_s, $\rho_s \neq \rho_c$, y $\rho_{as} \neq \rho_0$, identificados por el sufijo "s", y es válido sólo bajo estas condiciones. Para otro cuerpo con $\rho \neq \rho_s$, pesado en el mismo instrumento para pesar pero bajo condiciones diferentes: $g \neq g_s$ y $\rho_a \neq \rho_{as}$ la indicación en general es (despreciando los términos de 2^do^ orden o mayores):

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

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 una pieza en una densidad de aire igual a la densidad del aire de referencia: $\rho_a = \rho_0$, entonces

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

b) al pesar un cuerpo cuya densidad sea la misma que la densidad de la pesa de ajuste: $\rho = \rho_s$, entonces nuevamente (como en caso a)

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

c) pesando en la misma densidad del aire que al momento del ajuste: $\rho_a = \rho_{as}$, entonces

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

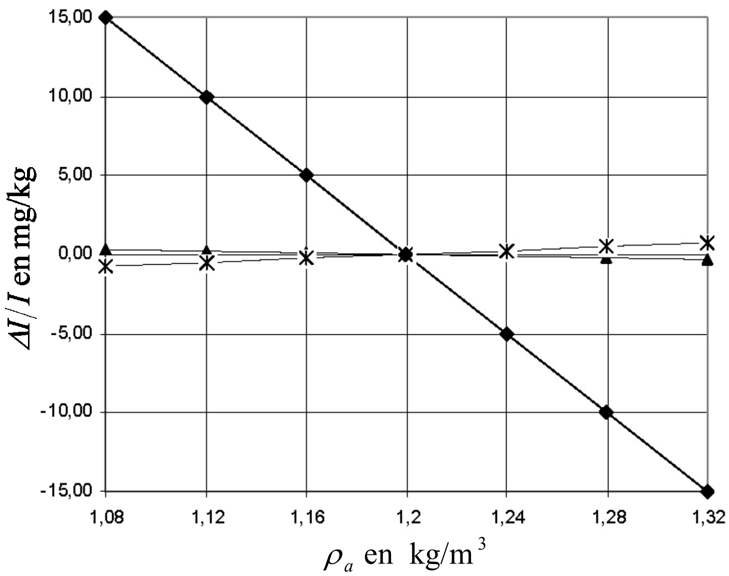
[1] El valor de masa convencional m_c de un cuerpo ha sido definido en [3] como el valor numérico de masa m de una pesa de densidad de referencia ρ_c = 8 000 kg/m³ que equilibra al cuerpo a 20 °C en aire cuya densidad ρ_0:

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

con ρ_0 = 1,2 kg/m³ = 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 densidad diferentes pero típicas.

Fig. 4.2-1 Variación de la indicación debido al empuje del aire



La línea 1 es válida para un cuerpo de $\rho =$ 7 810 kg/m³, pesada en $\rho_a = \rho_{as}$
La línea 2 es válida para una pieza de $\rho =$ 8 400 kg/m³, pesada en $\rho_a = \rho_{as}$
La línea 3 es válida para una pieza 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 de aire tiene un mayor efecto que una variación en la densidad del cuerpo.

En el apéndice A, se encuentra Información adicional sobre la densidad de aire, y en el Apéndice E, encontrará mayor información sobre el empuje de aire relacionado con las pesas patrón.

4.2.3 Efectos de convección

Donde las pesas han sido transportadas al lugar de calibración, estas posiblemente no tendrán la misma temperatura que el instrumento para pesar y su medio ambiente respectivo. En este caso se deberán observar dos fenómenos:

Una diferencia inicial de temperatura ΔT_0 podría ser reducida a un valor más pequeño de ΔT al ambientar durante un tiempo Δt; esto ocurre más rápidamente en pesas pequeñas que en pesas mayores.

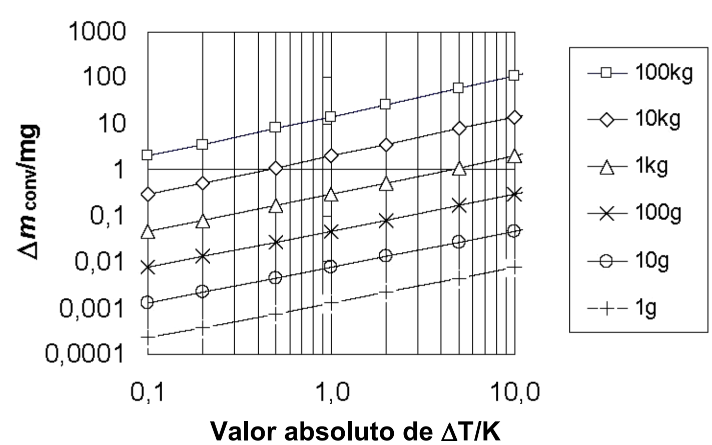
Cuando una pesa es puesta en el receptor de carga, la diferencia correspondiente de ΔT producirá un flujo de aire cerca de la pesa la cuál causará fuerzas parásitas resultando en un cambio aparente de su masa

Δm_{conv}. El signo de Δm_{conv} es normalmente contrario al signo de ΔT, su valor es mayor en pesas grandes que en pesas pequeñas.

Las relaciones entre cualquiera de las magnitudes mencionadas: ΔT_0, Δt, ΔT, m y Δm_{conv} son no lineales y dependen de las condiciones del intercambio de calor entre las pesas y su medio ambiente – vea [8].

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

Fig. 4.2-2 Efecto de convección



Este efecto debería tomarse en cuenta ya sea al dejar las pesas hasta que el cambio de Δm_{conv} sea despreciable en relación a la incertidumbre de calibración requerida por el cliente, o al considerar el posible cambio de la indicación en el presupuesto de la incertidumbre. El efecto puede ser significativo para pesas de alta exactitud, p. ej. para pesas de clase E_2 o F_1 de la R 111 [3].

Información detallada se encuentra adicionalmente en el Apéndice F.

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

$$E = I - m_{ref} \tag{4.2.4-1}$$

donde m_{ref} es un valor verdadero de masa convencional, 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}:

$$m_{ref} = m_{cCal} + \delta m_B + \delta m_{conv} + \delta m_D + \delta m... \tag{4.2.4-2}$$

La corrección para el empuje de aire δm_B es afectada por los valores de ρ_s y ρ_{as}, que fueron válidos para el ajuste pero no se conocen normalmente. Se supone que se han usado pesas de la densidad de referencia $\rho_s = \rho_c$ (4.2.2-3) entonces se obtiene una expresión general para la corrección

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

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:

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

B El instrumento fue ajustado independientemente de la calibración, en una densidad de aire desconocida ρ_{as} para la cuál se debería hacer una suposición razonable.

B1 Para calibraciones "*in situ*", ρ_{as} se espera sea similar a ρ_{aCal}, con una diferencia posible de $\delta\rho_{as} = \rho_{aCal} - \rho_{as}$. entonces (4.2.4-3) se modifica a

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

B2 Una simple suposición directa podría ser $\rho_{as} = \rho_0$, entonces

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

Vea también los apéndices A y E para obtener mayor información.

Los otros términos de corrección serán tratados en la sección 7.
El sufijo "Cal" será omitido en adelante si no hay necesidad de mencionarlo para evitar confusión.

4.3 Cargas de prueba

Las cargas de prueba deberían estar compuestas preferentemente de pesas patrón con trazabilidad a la unidad de masa del SI. Se pueden usar otras cargas de prueba para pruebas de comparación, p.e. para la prueba de carga excéntrica, para la prueba de repetibilidad – o únicamente para la carga de un instrumento – p. ej. precargas, carga de tara que necesita ser equilibrada, o carga de sustitución.

4.3.1 Pesas patrón

La trazabilidad de las pesas que se usarán como patrón se debería conseguir por la calibración[2] consistiendo en

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

Además los patrones deberían satisfacer los siguientes requisitos tanto como sea apropiado en vista de su exactitud:

3. la densidad ρ_s lo suficientemente cercana a ρ_C = 8 000 kg/m³
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 que calibrará se minimice.

Las pesas que cumplen con las especificaciones relevantes de la recomendación internacional OIML R 111 [3] deberían satisfacer todos esos requisitos.

Los errores máximos permitidos, o las incertidumbres de calibración de las pesas patrón deberían ser compatibles con la división de escala d [4] del instrumento para pesar y/o las necesidades del cliente con respecto a la incertidumbre de la calibración de su 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 estos casos, se pueden usar cargas diferentes a las pesas patrón considerando lo siguiente:

1. la forma, el material, y la aleación deberían permitir el fácil manejo,
2. la forma, el material, y la composición deberían permitir la fácil estimación de la posición del centro de gravedad,
3. su masa tiene que permanecer constante durante todo el período de la calibración,
4. su densidad debería ser fácil de estimar,
5. cargas con densidad baja (p. ej. contenedores llenos de arena o grava) podrían requerir atención especial con relación al empuje de aire.

[2] ILAC-P 10-2002, nr. 2(b): Trazabilidad se debería derivar donde sea posible,...“de un laboratorio de calibración que puede demostrar competencia, capacidad de medir y trazabilidad con una incertidumbre de medición apropiada, p. ej. un laboratorio de calibración acreditado...“ y Nota 3: ..ILAC reconoce que algunas calibraciones económicas realizadas por autoridades de verificación nombradas bajo sus marcos de metrología Legal también son aceptados.“

La temperatura y la presión barométrica podrían requerir supervisión durante todo el período de uso de las cargas para la calibración.

4.3.3 Uso de cargas de sustitución

Una carga de prueba en valor de masa convencional se debería realizar completamente con pesas patrón. Pero donde esto no sea posible, se puede usar cualquier carga que satisfaga a 4.3.2 para sustituirla. El instrumento para pesar que se está calibrando se usa como comparador para ajustar la carga de sustitución L_{sub} tal que resulte aproximadamente la misma indicación I que en la carga correspondiente L_{St} que se realizó con pesas patrón.

Una primera carga de prueba L_{T1} realizada con pesas patrón m_{c1} es indicada como:

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

Después de remover L_{St} se aplica una carga de sustitución L_{sub1} y se ajusta para obtener aproximadamente la misma indicación:

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

tal que

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

La próxima carga de prueba L_{T2} se realiza al añadir m_{c1}

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

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

El procedimiento se puede repetir para generar cargas de prueba $L_{T3}, \ldots L_{Tn}$:

$$L_{Tn} = nm_{c1} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \ldots + \Delta I_{n-1} \tag{4.3.3-5}$$

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 hubiera realizado solo con pesas patrón. Ese efecto se debe a los efectos de repetibilidad y resolución del instrumento para pesar. – consulte también 7.1.2.6[3].

[3] Ejemplo: para 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

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:

$$I = I_L - I_0 \tag{4.4.1-1}$$

Es preferible registrar las indicaciones sin carga en conjunto con las indicaciones de carga para cualquier medición de prueba. Sin embargo, registrar las indicaciones sin carga puede ser redundante en donde un procedimiento de prueba requiera el ajuste a cero de cualquier indicación sin carga que no sea igual a cero por si misma, antes de que se aplique la carga de prueba.

La indicación I del instrumento para pesar para cualquier carga de prueba, incluyendo sin carga, se lee y registra sólo si se puede considerar como carga estable. Donde la alta resolución del instrumento para pesar o las condiciones ambientales en el sitio de la calibración impiden indicaciones estables, se debería registrar un valor medio en conjunto con información acerca de la variabilidad observada (p. ej. dispersión de valores, deriva unidireccional).

Durante las pruebas de la calibración, se deberían 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 medios para obtener indicaciones con resoluciones mayores que d, p.e. cuando se verifica el cumplimiento de las especificaciones y se desea una incertidumbre menor. Tales medios podrían ser:

1. cambiar el dispositivo de indicación a división de escala menor $d_T < d$ ("modo de servicio").
   En este caso la indicación I_x es obtenida como un número entero múltiplo de d_T.
2. adicionar pesas de prueba pequeñas en incrementos de $d_T = d/5$ o $d/10$ para determinar con mayor precisión un cambio no ambiguo en la indicación de la carga, de I' a $I' + d$. ("método de cambio de resolución"). En este caso se registra la indicación I' en conjunto con la cantidad n de pesas de prueba pequeñas adicionales ΔL necesaria para aumentar I' en un d. La indicación I_L es

$$I_L = I' + d/2 - \Delta L = I' + d/2 - nd_T \tag{4.4.2-1}$$

Cuando se aplica el método de cambio de resolución, se recomienda aplicar también para las indicaciones en cero así como el registro de todas.

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.

Un laboratorio de calibración al decidir sobre el número de mediciones a realizar para calibraciones rutinarias que implementará en su procedimiento, debería tomar en cuenta que normalmente un mayor número de mediciones reduce la incertidumbre pero al mismo tiempo aumenta los costos.

El cliente y el laboratorio de calibración deberán 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 debería 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 ser calibrada ni verificada a menos que los resultados sirven para la determinación de errores de indicación conforme a 5.2. La carga de prueba debería ser, hasta donde sea posible, de una sola pieza.

La prueba se realiza con al menos una carga de prueba L_T la cual debería ser elegida con una relación razonable al Max y la resolución del instrumento, que permita una valoración del desempeño del instrumento. Para instrumentos con una división de escala d constante, una carga de $0{,}5Max \leq L_T \leq Max$ es muy común; este valor es comúnmente reducido para instrumentos en donde $L_T > 0{,}5Max$ podría acumular varios miles de kilogramos. Para instrumentos multi-intervalo [4] se puede preferir una carga cerca de Max_1. Ambas partes pueden acordar un valor especial de L_T que se justifique considerando 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 $L_T \geq 100\ \mathrm{kg}$.

Se registran las indicaciones I_{Li} para cada colocación de la carga. Cada vez que se remueve la carga, se tiene que verificar si la indicación regresa a cero, y la indicación debe ajustarse a cero si esta no regresa a cero; registrando las indicaciones sin carga I_{0i} como se recomienda en 4.4.1. Adicionalmente, se registra el estado del dispositivo de indicación a cero, si este esta disponible.

5.2 Prueba para los errores de las indicaciones

Esta prueba se realiza con $k_L \geq 5$ diferentes cargas de prueba L_{Tj}, $1 \leq j \leq k_L$, distribuidas uniformemente sobre el alcance normal de medición[4] o sobre puntos de prueba individuales acordados conforme a 4.1.2.

El objetivo de esta prueba es una estimación del desempeño del instrumento en el alcance completo de la medición.

Cuando fue acordado un alcance de calibración significantemente más pequeño, por consecuencia se puede reducir el número de cargas de prueba, si existen por lo menos 3 puntos de prueba incluyendo Min' y Max' y la diferencia entre dos cargas de prueba consecutivas es no mayor a $0{,}15Max$.

Es necesario que las cargas de prueba estén compuestas de pesas patrón 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. aumentando por pasos con descarga entre los mismos – conforme con el uso de la mayoría de los instrumentos para pesar en el en pesaje de una sola carga,
2. aumento continúo por pasos – similar a 1; puede incluir deriva en los resultados, reduce la cantidad de movimientos de colocar y quitar cargas del receptor en comparación con 1,
3. aumentando continuamente y quitando por pasos – procedimiento prescripto para pruebas de verificación en [4], los mismos comentarios que para 2,
4. quitando continuamente por pasos empezando en Max - simula el uso de un instrumento como balanza de tolva para pesada sustractiva, los mismos comentarios que para 2.

Con instrumentos multi-intervalos - ver [4], los métodos anteriores se pueden modificar para alcances de carga menores que Max ascendiendo y/o descendiendo las cargas de tara, al utilizar la función de ajuste automático a cero y aplicando una carga de prueba cercana pero no superiores a Max_1 para obtener indicaciones con d_1.

Se pueden realizar pruebas adicionales para evaluar el desempeño del instrumento bajo condiciones especiales de uso, p.e. la indicación después del ajuste a cero, la variación de la indicación bajo una carga constante durante un

---

[4] Ejemplos de valores objetivos:

$k_L = 5$: cero o *Min*; *0,25 M*ax; *0, 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 varias del valor objetivo hasta *0,05 Max*, ofreciendo una diferencia entre cargas de prueba consecutivas de al menos *0,08 Max*.

tiempo especificado, etc.

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

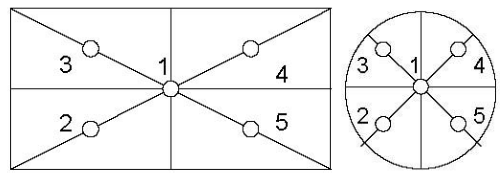
Indicaciones I_{Lj} se registran para cada carga. Después de que cada carga es removida, se tiene que verificar si la indicación se mantiene en cero y se ajusta a cero si no es así, se registran las indicaciones sin carga I_{0j} según 4.4.1.

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 imagen 4.4.3-1 o en posiciones similares.

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

1. Centro
2. Superior izquierda
3. Inferior izquierda
4. Inferior derecho
5. Superior derecho



Para un alcance de pesada reducido, la carga de prueba L_{ecc} debería ser al menos de $Max/3$, o como mínimo $Min' + (Max' - Min')/3$. Si están disponibles, se deberían considerar las indicaciones del fabricante, y limitaciones evidentes debidas al diseño del instrumento, p.e. ver EN 45501 [4] para balanzas de plataforma.

La carga de prueba no requiere ser calibrada ni verificada a menos que los resultados sirven 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.

Indicaciones I_{Li} se registran para cada carga. Después de remover cada vez la carga se tiene que verificar si la indicación regresa a cero y si es necesario se ajusta a cero la indicación, se registran las indicaciones sin carga I_{0j} según 4.4.1.

5.4 Mediciones auxiliares

Se recomiendan las siguientes mediciones adicionales o registros, en especial si una calibración se quiere realizar con la menor incertidumbre posible.

Considerando los efectos del empuje del aire – vea. 4.2.2:
Se debería medir por lo menos una vez durante la calibración la temperatura del aire razonablemente cercana al instrumento. Cuando el instrumento se utiliza en un medio ambiente controlado, se debería registrar el intervalo de la variación de temperatura observado, p.e. de la 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 - ver 4.2.3:
Se debería tener cuidado especial para prevenir los efectos de convección excesivos, al observar los valores límites de la diferencia de temperatura entre las pesas patrón y el instrumento, y/o registrar el tiempo de ambientación conseguido. Un termómetro dentro de la caja con pesas patrón puede ser útil para verificar la diferencia de temperatura.

Considerando los efectos de interacción magnética:
Con instrumentos de alta resolución se recomienda realizar una verificación para ver si se puede detectar algún efecto de interacción magnética. Una pesa patrón se pesa en conjunto con una pieza de separación fabricada de material no metálico (p.e. madera, plástico), la pieza de separación se coloca arriba o abajo la pesa para obtener dos diferentes indicaciones.
Si la diferencia de esas dos indicaciones es diferente de cero, se debería mencionar como advertencia en el 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 son 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 certificado de calibración.

La definición de una indicación I como se encuentra en 4.4 se usa en esta sección.

6.1 Repetibilidad

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

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

con

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

Donde solo una carga de prueba ha sido aplicada, el índice j podría ser omitido.

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:

$$E_j = I_j - m_{refj} \tag{6.2-1a}$$

Donde la indicación I_j es el promedio de más de una lectura, I_j se entiende como el valor medio conforme a (6.1-2).

m_{ref} es la pesa de referencia o "valor verdadero" de la carga. – ver 4.3.1, 4.3.3.

La pesa de referencia es

o el valor nominal de la carga m_N ,

$$m_{refj} = m_{Nj} \tag{6.2-2}$$

o su correspondiente valor de m_c

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

Cuando una carga de prueba se formó con más de una pesa, m_{Nj} se reemplaza por $\left(\sum m_N\right)_j$ y δm_{cj} es sustituido por $\left(\sum \delta m_c\right)_j$ en la fórmula anterior.

Cuando un error y/o indicación se menciona o se usa adicionalmente en relación con la carga de prueba, se debería presentar siempre en relación con el valor nominal m_N de la carga, incluso si se ha utilizado el valor de masa para obtenerlo. En este caso el error queda sin cambios, en tanto la indicación se modifica por

$$I(m_N) = I'(m_c) - \delta m_c \tag{6.2-4}$$

Siendo I' la indicación (provisional) determinada cuando se aplicó m_c.

(6.2-1a) entonces toma la forma de

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

6.2.2 Curva característica del alcance de pesada

Adicionalmente, o como una alternativa a los valores discretos I_j, E_j, se puede determinar una curva característica, o curva de calibración, para el alcance de pesada que permita la estimación del error de indicación para cualquier indicación I dentro del alcance de pesada.

Una función

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

podría ser generada por una apropiada aproximación la cual en general, debería estar basada en el método de “mínimos cuadrados”:

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

con

v_j = residual

f = función de aproximación

La aproximación también debería

considerar las incertidumbres de los errores $u(E_j)$,

usar un modelo de la función que refleje las propiedades físicas del instrumento, p.e. la forma en que se relacionan la carga y su indicación $I = g(L)$,

incluir la comprobación de que los parámetros encontrados para la función modelo son consistentes matemáticamente con los datos correspondientes.

Se asume que para cada m_{Nj} el error E_j permanece igual si la indicación correspondiente I_j se reemplaza por su valor nominal I_{Nj}. Los cálculos para evaluar (6.2-6) se pueden realizar entonces con el conjunto de datos de m_{Nj}, E_j, o I_{Nj}, E_j.

El apéndice C ofrece consejos para la selección de una fórmula de aproximación apropiada y para los cálculos necesarios.

6.3 Efecto de carga excéntrica

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

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

Si la carga de prueba consistió de pesa(s) patrón, los errores de indicación se pueden calcular de la siguiente manera:

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

7 *INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN*

En esta sección y en las siguientes se encuentran términos de incertidumbre asignados a pequeñas correcciones, los cuales son proporcionales a valores específicos de masa o una indicación especifica. 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

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

con el término adimensional $u(corr)$, entonces

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

Por consiguiente, la variancia correspondiente será denotará por $\hat{w}^2(m_{corr})$ y la incertidumbre expandida asociada por $\hat{W}(m_{corr})$.

7.1 Incertidumbre estándar para valores discretos

La fórmula básica para la calibración es

$$E = I - m_{ref} \tag{7.1-1}$$

con las varianzas

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

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

Posteriormente los términos se expanden.

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:

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

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 supone una distribución rectangular, por lo tanto

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

o

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

respectivamente.

Nota 1: consulte 4.4.2 para el significado de d_T

Nota 2: en un instrumento que se ha sido aprobado según la EN 45501 [4], el error de redondeo de una indicación de cero se limita a $d_0/4$ después del ajuste a cero o proceso de tarar, así que

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

7.1.1.2 δI_{digL} considera al error de redondeo de 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

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

o

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

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,

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

con $s(I_j)$ acorde a 6.1.

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

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

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.

Si se han determinado varias s_j ($s_j = s(I_j)$ en notación abreviada) con diferentes cargas de prueba, se debería usar el mayor valor de s_j de los dos puntos de prueba que incluyan al valor de la indicación cuyo error fue determinado.

Donde se pueda establecer que los valores de s_j determinados con diferentes cargas de prueba L_{Tj}, tienen una relación funcional con la carga, esta función se puede aplicar para combinar los valores de s_j en una desviación estándar "ponderada" s_{pool}.

Ejemplos para tales funciones son

$$s_j = \text{constante} \tag{7.1.1-7}$$

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

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

Nota: Para la desviación estándar declarada en un certificado de calibración, se debería aclarar cuando ésta esté relacionada con una indicación única o si se trata del promedio de n indicaciones.

7.1.1.4 δI_{ecc} considera el error debido a la colocación del centro de gravedad de la carga de prueba fuera de la posición central del receptor de carga del instrumento. Este efecto puede ocurrir si la carga de prueba esta compuesta de más de una pieza. Cuando este efecto no se puede despreciar, el estimado de su magnitud se puede fundamentar en las siguientes suposiciones:

las diferencias determinadas por (6.3-1) son proporcionales a la distancia de la carga al centro del receptor de carga y del valor de la carga;
la excentricidad del centro de gravedad efectivo de la carga de prueba no es mayor a $1/2$ del valor obtenido en 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

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

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

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

o en notación relativa,

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

7.1.1.5 La incertidumbre estándar de la indicación normalmente se obtiene por

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

Nota 1: la incertidumbre $u(I)$ es = constante sólo si s = constante y no se ha considerado ningún error de excentricidad.
Nota 2: los primeros dos términos del lado derecho podrían ser modificados en casos especiales como los 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:

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

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.

Los 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 certificado de calibración para las pesas patrón, en conjunto con la incertidumbre de calibración U y el factor de cobertura k. La incertidumbre estándar es

$$u(\delta m_c) = U/k \tag{7.1.2-2}$$

Cuando la pesa patrón ha sido calibrado con tolerancias especificas Tol , p.e. al mpe dado en R 111, y donde se usa con su valor nominal m_N , entonces $\delta m_c = 0$, y se asume distribución rectangular, tal que

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

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: Donde se ha establecido la conformidad de la(s) pesa(s) patrón con R 111, se puede modificar (7.1.2-3) al reemplazar Tol por mpe. Para pesas de $m_N \geq 0{,}1$ kg el cociente mpe/m_N es constante para todas las pesas pertenecientes a la misma clase de exactitud,

$mpe = c_{class} m_N$ con c_{class} de la tabla 7.1-1.

entonces puede usarse (7.1.2-3) de la forma

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

o como incertidumbre estándar relativa

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

Tabla 7.1-1 Cociente $c_{class} = mpe/m_N$ para pesas patrón m_N ≥ 100 g conforme a la R 111 [3]

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 para el empuje de aire tal como fue presentada en 4.2.4. El valor depende de la densidad ρ para la pesa de calibración, en el intervalo de densidad de aire ρ_a asumido, y en el ajuste del instrumento – vea los casos A y B en 4.2.4.

Caso A:

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

con la incertidumbre estándar relativa obtenida de

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

Caso B1:

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

con la incertidumbre estándar relativa obtenida de

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

Caso B2:

$$\delta m_B = -m_N(\rho_a - \rho_0)/\rho \tag{7.1.2-8}$$

con la incertidumbre estándar relativa obtenida de

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

En la medida en que se conozcan los valores de ρ, $u(\rho)$, ρ_a y $u(\rho_a)$, estos deberían ser utilizados para determinar $\hat{w}(m_B)$.

La densidad ρ y su incertidumbre estándar pueden ser estimadas de acuerdo al estado del arte de dichas mediciones, en ausencia de la información adecuada. El apéndice E1 ofrece valores reconocidos internacionalmente para materiales comúnmente utilizados para la fabricación de pesas patrón.

La densidad de aire ρ_a y su incertidumbre estándar se pueden calcular de la temperatura y la presión barométrica (la humedad relativa, de menor influencia), o se puede estimar de la altitud sobre el nivel de mar, si éstos valores están disponibles.

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

Se podría utilizar una simple aproximación de los mismas estimados de ρ_a y ρ_{as} y la misma incertidumbre para ambos valores.

El apéndice A ofrece varias fórmulas e información sobre las varianzas esperadas.

El apéndice E ofrece valores de $\hat{w}(m_B)$ para algunas combinaciones seleccionadas de valores de ρ y ρ_a. Para calibraciones del caso A, los valores se pueden despreciar en la mayoría de los casos.

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

Donde este establecida la conformidad de las pesas patrón a R 111[3], y no este disponible ninguna información sobre ρ y ρ_a, se puede recurrir a la sección 7 de la R 111[5]. Al no aplicar ninguna corrección, las incertidumbres relativas son

el caso A son,

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

para los casos B1 y B2,

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

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

para clase E_2: $|\rho - \rho_c| \leq 200$ kg/m³, y para clase F_1: $|\rho - \rho_c| \leq 600$ kg/m³.

Nota: Debido a que la densidad de materiales utilizados para las pesas patrón normalmente está más cerca a ρ_c que lo permitido por los límites de la R111, 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 una corrección para la posible deriva de m_c desde la última calibración. Un valor límite D se asume de mejor manera, basado en la diferencia evidente en m_c de certificados de calibraciones consecutivos de las pesas patrón.

En ausencia de tal información, se puede estimar D considerando la calidad de las pesas, la frecuencia y el cuidado de su uso, como un múltiple de su incertidumbre expandida $U(m_c)$:

$$D = k_D U(m_c) \tag{7.1.2-10}$$

donde k_D puede ser elegido de 1 a 3.

No se recomienda aplicar una corrección, pero se asume una distribución de probabilidad uniforme dentro de $\pm D$ (distribución rectangular). La incertidumbre estándar entonces es

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

Cuando un juego de pesas ha sido calibrado con una incertidumbre relativa

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

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

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

Para pesas en conformidad con la R111 [3], 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 se recomienda la aplicación de una corrección pero se asume una distribución de probabilidad uniforme dentro de $\pm \Delta m_{conv}$. La incertidumbre estándar es

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

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

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

con las contribuciones de 7.1.2.1 a 7.1.2.4.

Como ejemplo de los términos específicos para una calibración del caso A con pesas patrón de $m_N \geq$ 0,1 kg conforme a R111, usando sus valores nominales:

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

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 $L_{Tn} = nm_{c1} + \Delta I_1 + \Delta I_2 + \ldots + \Delta I_{n-1}$ está dada por la expresión siguiente:

$$u^2(L_{Tn}) = n^2 u^2(m_{c1}) + 2\left[u^2(I_1) + u^2(I_2) + \ldots + u^2(I_{n-1})\right] \qquad (7.1.2\text{-}15)$$

con $u(m_{c1}) = u(m_{ref})$ 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 ser incluidas también para indicaciones con cargas de sustitución ajustadas tal 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 de las cargas de sustitución, donde estas sean de materiales de baja densidad (p.e. arena, grava) **y** la densidad de aire difiera considerablemente durante el tiempo de uso de las cargas de sustitución.

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

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

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,

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

o, si se aplican incertidumbres relativas, de

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

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 3 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:

$$u^2(E) = \alpha^2 + \beta^2 I^2 \qquad (7.1.3\text{-}2)$$

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 la curva característica

Cuando se realiza una aproximación para obtener una fórmula $E = f(I)$ para el alcance completo conforme a 6.2.2, la incertidumbre estándar del error según 7.1.3 tiene que ser modificada para ser consistente con el método de aproximación. Dependiendo 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 deberían 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 la calibración

La incertidumbre expandida del error es

$$U(E) = ku(E) \tag{7.3-1}$$

El factor de cobertura k, se debería 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 (p.e. tiene un número suficiente de grados de libertad).

El apéndice B2 ofrece información adicional a estas condiciones, y el Apéndice B3 recomienda como determinar el factor k cuando uno o los dos de los elementos anteriores 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 de un resultado de pesada

El usuario de un instrumento debería estar advertido del hecho que en el uso normal de un instrumento que ha sido calibrado, en algunos casos, si no todos, la situación es diferente de la calibración, en los siguientes aspectos:

1. las indicaciones obtenidas para objetos pesados no son las mismas que las que se obtuvieron durante la calibración,
2. el proceso de pesada puede ser diferente del procedimiento de calibración:
   a. seguramente sólo una lectura para cada carga, no varias lecturas para obtener el valor promedio,
   b. la lectura es según la división de escala del instrumento d, no con una resolución mayor,
   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 "tara" (ajuste a cero),
   etc.
3. el medio ambiente puede ser diferente (temperatura, presión barométrica, etc.),

4. con instrumentos que no son reajustados regularmente p.e. el ajuste puede haber cambiado por envejecimiento o por desgaste debido al uso de algún dispositivo interno.
   En contraposición a los puntos del 1 al 3, este efecto depende normalmente del tiempo que ha pasado desde la calibración, esto debería ser considerado en relación a un período de tiempo seguro, p.e. para un año o para el intervalo normal entre calibraciones.

Con la intención de distinguir claramente de indicaciones I obtenidas durante la calibración, los resultados de la pesada obtenidos pesando una carga L en el instrumento calibrado 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.

R se entiende como lectura particular en una resolución normal (múltiple de d) con las correcciones a ser aplicadas como corresponda.

Para una lectura realizada bajo las mismas condiciones que durante la calibración, para una carga bien centrada en el receptor de carga, sólo aplican correcciones consideradas para los puntos anteriormente mencionados en 2a y 2b. El resultado puede ser denominado como resultado de pesada bajo las condiciones de la calibración $W*$:

$$W* = R + \delta R_{digL} + \delta R_{rep} - \left(R_0 + \delta R_{dig0}\right) - E \qquad (7.4\text{-}1a)$$

con la incertidumbre asociada

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

$W*$ y $u(W*)$ pueden ser determinados directamente usando la información, y los resultados de la calibración como están en el certificado de calibración:

el conjunto de datos I_{cal}, E_{cal}, $U(E_{cal})$, y/o
la curva característica $E(R) = f(I)$ y $U(E(R)) = g(I)$.

Eso es realizado en 7.4.1. y 7.4.2.

Considerando las posibles influencias que permanecen en los resultados de la pesada, formalmente se añaden correcciones adicionales a la lectura de una forma general resultando en la forma general del resultado de pesada:

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

con la incertidumbre asociada

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

Los términos añadidos y las incertidumbres estándares correspondientes son discutidos en 7.4.3 y 7.4.4. Las incertidumbres estándares $u(W*)$ y $u(W)$ se presentan finalmente en 7.4.5.
Las secciones 7.4.3 y 7.4.4, y la información de $u(W)$ y $U(W)$ en las secciones

7.4.5 y 7.5, son destinadas para ofrecer consejos al usuario del instrumento sobre como estimar la incertidumbre de los resultados de pesada obtenidos bajo condiciones normales de uso. Estos no son exhaustivos ni obligatorios.

Cuando un laboratorio de calibración ofrece tal estimación a sus clientes, basada en la información que no fue obtenida por el laboratorio, estas estimaciones no se deberían presentar como parte del 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) reemplazando I por R:

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

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

Las correcciones y sus incertidumbres estándares son:

7.4.1.1 δR_{dig0} considerado debido al error de redondeo de la lectura a cero. Aplica 7.1.1.1 con la excepción de la variante $d_T < d$, en este caso se excluye, tal que

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

Aplica la nota 2 en 7.1.1.1

7.4.1.2 δR_{digL} considerado debido al error de redondeo de la lectura de carga. Aplica 7.1.1.2 con la excepción de la variante $d_T < d_L$ en este caso se excluye, tal que

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

7.4.1.3 δR_{rep} considerado debido al error por repetibilidad imperfecta. Aplica 7.1.3.1, la desviación estándar relevante s o $s(I)$ para una sola lectura se toma del certificado de calibración, tal que

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

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

7.4.1.4 δR_{ecc} considerado debido al error de posicionamiento descentrado de la carga. Se ha puesto entre paréntesis ya que normalmente sólo es relevante para W y no para $W*$, de cualquier manera será considerada en 7.4.4.3.

7.4.1.5 La incertidumbre estándar de la lectura se obtiene por

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

el término entre paréntesis $\{\ \}$ se añade cuando corresponde,

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

7.4.2 Incertidumbre del error de una lectura

Cuando una lectura R corresponde a una indicación I_{calj} declarada en el certificado de calibración, el valor de $u(E_{calj})$ debería tomarse del mismo. Para otras lecturas, $u(E(R))$ se puede calcular por (7.1.3-2) si α y β son conocidos o son el resultado de una interpolación o de una fórmula de aproximación conforme con 7.2.

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

Nota: el certificado de calibración normalmente presenta a $U_{95}(E_{cal})$ del cual el valor de $u(E_{cal})$ se obtiene considerando el factor de cobertura k dado en el certificado.

7.4.3 Incertidumbre debido a influencias ambientales

El término de corrección δR_{instr} considera hasta 3 efectos que se discuten posteriormente. Normalmente no aplican para instrumentos que se ajustan correctamente previo al uso - vea 4.2.4, caso A. Para otros instrumentos se deberían considerar cuando aplique. De hecho, no se aplica ninguna corrección, las incertidumbres correspondientes se estiman en base al conocimiento del usuario de las propiedades del instrumento.

7.4.3.1 Un término δR_{temp} considerado debido al cambio en la curva característica (o el ajuste) del instrumento causado por un cambio en la temperatura ambiental. Se puede estimar un valor límite de $\delta R_{temp} = TK\Delta T$ con los siguientes términos.

Normalmente hay una especificación del fabricante como $TK = \partial(Max)/\partial T$, muchas veces citada como $|TK| \leq |TC|$ in 10^{-6}/K. En su defecto, para instrumentos con aprobación de modelo bajo EN 45501 [4] o R 76 [6], se puede suponer $|TC| \leq mpe(Max)/(Max\Delta T_{Appr})$ donde ΔT_{Appr} es la temperatura de aprobación marcada en el instrumento; para otros instrumentos se tiene que hacer alguna de las siguientes opciones, o una suposición conservadora quedando como un múltiplo (de 3 a 10 veces) del valor comparable para instrumentos con aprobación de modelo, o no dar ninguna información sobre el instrumentos a temperaturas diferentes de las que se presentaron durante la calibración.

El intervalo de variación de temperatura ΔT (intervalo completo) se debería estimar considerando el lugar donde se ha usado el instrumento, como es discutido en el Apéndice A.2.2.

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

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

7.4.3.2 Un término δR_{bouy} considerado debido al cambio en el ajuste del instrumento ocasionado por la variación de la densidad de aire; no se aplica ninguna corrección, la contribución de la incertidumbre se considera de acuerdo a 7.1.2.2,

donde se espera una variabilidad de la densidad de 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 Un término δR_{adj} considerado debido al cambio del ajuste del instrumento desde la calibración causado por el envejecimiento o el desgaste.

Un valor límite se puede tomar de calibraciones anteriores, donde éstas existan, como la diferencia más grande $|\Delta E(Max)|$ en los errores cercanos al Max entre dos calibraciones consecutivas. En su defecto, $\Delta E(Max)$ se debería tomar de la especificación del fabricante para el instrumento o puede ser estimado a $\Delta E(Max) = mpe(Max)$ para instrumentos que cuentan con aprobación de modelo bajo la EN 45501 [4] o la R 76 [6]. Cualquiera de esos valores puede ser considerado prácticamente de progreso lineal en vista del intervalo de tiempo esperado entre calibraciones.
Se asume una distribución rectangular, así que la incertidumbre relativa es

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

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

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

7.4.4 Incertidumbre por la operación del instrumento

El término de corrección δR_{proc} debido a errores adicionales que pueden ocurrir si el procedimiento de pesada es diferente al utilizado para la calibración. No se aplican correcciones pero las incertidumbres correspondientes se estiman basándose en el conocimiento del usuario de las propiedades del instrumento.

7.4.4.1 Un término δR_{Tare} considerado debido al resultado de pesada neta después de la operación de ajuste a cero [4]. El posible error y su incertidumbre correspondiente se deberían estimar considerando la relación básica entre las lecturas involucradas:

$$R_{Net} = R'_{Gross} - R'_{Tare} \tag{7.4.4-1}$$

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:

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

consistente con (7.3-1). Los errores en *Bruto* y *Tara* se tendrían que tomar como errores para los valores equivalentes de R conforme con la fórmula de anterior. De cualquier manera, y consecuentemente el valor *Tara* – y consecuentemente el valor *Bruto* – no se registran normalmente.

El error podría ser estimado como

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

Donde $E(Net)$ = 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 esta función es conocida, o la pendiente q_E entre puntos consecutivos de la calibración se puede calcular por

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

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 suponer una distribución rectangular. Esto resulta en la incertidumbre estándar relativa

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

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

7.4.4.2 Un término δR_{time} debido a posibles efectos de deriva e histéresis en situaciones como las siguientes:

a) con carga en calibración fue continuamente creciente, o continuamente creciente y decreciente (método 2 o 3 en 5.2), tal que la carga se quedó en el receptor de carga durante un cierto periodo de tiempo; esto es muy significativo cuando se ha aplicado el método de sustitución, normalmente en instrumentos de alta capacidad. Cuando en uso normal, una carga discreta a ser pesada se coloca en el receptor de carga y se mantiene ahí tanto tiempo como sea necesario para obtener una lectura o impresión, el error de indicación puede diferir 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

$$\hat{w}(R_{time}) = \Delta E_{j\max} / \left(m_j \sqrt{12}\right) \tag{7.4.4-6}$$

Cuando las pruebas sólo se realizaron ascendiendo, el error en regreso a cero E_0, si este fue determinado, se puede usar para estimar una incertidumbre estándar relativo

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

En ausencia de tal información, se puede estimar el valor límite para instrumentos con aprobación de modelo bajo la EN 45501 [4] o la R 76 [6] como

$$\Delta E(R) = Rmpe(Max)/Max \tag{7.4.4-8}$$

Para instrumentos sin tal aprobación de modelo, un múltiplo de este valor (n = 3 hasta 10 veces) sería una estimación conservadora.

La incertidumbre estándar relativa es

$$\hat{w}(R_{time}) = mpe(Max)/\left(Max\sqrt{3}\right),\ \text{o}\ = nmpe(Max)/\left(Max\sqrt{3}\right) \tag{7.4.4-9}$$

b) la carga en calibración se realizó sin descargar entre pasos, las cargas a ser pesadas se mantienen en el receptor de carga por un período mayor. En ausencia de información adicional – p.e. observación del cambio de indicación durante un período fijo de tiempo – se puede recurrir a (7.4.4-9) tanto como sea aplicable.

c) la carga durante la calibración se realizó solo de manera creciente, en el uso se realizan pesadas de descarga. Esa situación se puede tratar como la inversa del funcionamiento con ajuste a cero - vea 7.4.4.1 – combinado con punto b) anterior. (7.4.4-5) y (7.4.4-9) aplican.

Nota: En el caso de la pesada de descarga, la lectura R debería ser tomada como un valor positivo, aún cuando esta haya sido presentada como negativa por el instrumento para pesar.

7.4.4.3 δR_{ecc} considera al error por posicionamiento descentrado de la carga. Se aplica 7.1.1.4 con la modificación de que el efecto encontrado durante la calibración se debería considerar por completo, tal que

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

7.4.4.4 cuando se pesan objetos dinámicos, p.e. animales vivos, se asume que $u(\delta I_{rep})$ se incrementará. Por lo tanto se debería usar un objeto típico para determinar la desviación estándar s_{dyn} de al menos 5 pesadas, y $s(R)$ en (7.4.1-5) debería ser reemplazada por s_{dyn} .

7.4.5 Incertidumbre estándar de un resultado de pesada

La incertidumbre estándar de un resultado de pesada se calcula de los términos especificados desde 7.4.1 hasta 7.4.4, tanto como aplique.

Para el resultado de pesada bajo condiciones de la calibración:

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

Para el resultado de pesada en general:

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

El término $\boldsymbol{u^2}(\boldsymbol{W*})$ 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

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

α_W^2 es la suma cuadrática de todas las incertidumbres estándares absolutas, y β_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 un resultado de pesada, la cual es igual a la lectura corregida para el error determinado por calibración, es

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

o

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

como corresponda.

La incertidumbre expandida $U(W)$ será determinada como

$$U(W*) = ku(W*) \quad (7.5\text{-}2a)$$

o

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

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

Para $U(W*)$ el factor de cobertura k se debería determinar conforme con 7.3.
Para $U(W)$ el factor de cobertura k será en la mayoría de los casos k = 2 por el gran número de términos que constituyen a $u(W)$, incluso donde la desviación estándar s es obtenida de sólo algunas mediciones, y/o donde sea declarado en el certificado de calibración $k_{cal} > 2$.
En caso de duda, k se debería determinar según 7.3 para

$u(W(R = 0)) = \alpha_W$, 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 podrían acordar la obtención de una “incertidumbre global” $U_{gl}(W)$ que incluya los errores de indicación tal que no se tengan que aplicar correcciones a las lecturas en uso:

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

A menos de que los errores sean más o menos centrados en cero, estos forman una contribución unilateral a la incertidumbre que solo se puede tratar de manera aproximada. Por simplicidad y conveniencia, la mejor manera de declarar la "incertidumbre global" es en la forma de una expresión para todo el alcance de pesada, en lugar de valores individuales para valores fijos del resultado de pesada.

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

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

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

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

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

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

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

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 E^0 ver el Apéndice C.

Es importante asegurar que $U_{gl}(W)$ mantiene una probabilidad de cobertura no menor al 95 % sobre el alcance de pesada completo.

7.5.3 Otras maneras de calificación del instrumento

Un cliente podría esperar de, o haber preguntado al Laboratorio de Calibración por una declaración de conformidad con respecto a una especificación determinada, como $|W - R| \leq Tol$ con Tol siendo la tolerancia aplicable. La tolerancia podría ser especificada como "$Tol = x\%$ de R", o "$Tol = nd$", u otra forma semejante.
La conformidad puede ser declarada, en consistencia con ISO/IEC 17025 bajo la condición de que

$$|E(R)| + U(W(R)) \leq Tol(R) \tag{7.5.3-1}$$

ya sea para un valor individual de R o para cualquier valor dentro de todo o parte del alcance de pesada.

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

8 CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Esta sección contiene consejos sobre la información que puede ser útil ofrecer en un certificado de calibración. Se pretende ser consistente con los requerimientos de la 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 persona(s) autorizada(s).

Identificación del cliente.

Identificación del instrumento calibrado,
información del instrumento (fabricante, tipo de instrumento, Max, d, lugar de instalación).

Advertencia de que el certificado puede ser reproducido solo de manera íntegra a menos de que el laboratorio de calibración autorice lo contrario por escrito.

Referencia al acuerdo del Reconocimiento Multilateral de la *EA* entre entidades de acreditación, cuando aplique y se desea.

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 acerca del instrumento (ajuste realizado, cualquier anormalidad del funcionamiento, ajustes del programa de computo (*software*) si esto es relevante para la calibración, etc.).

Referencia a, o descripción del procedimiento aplicado, en caso de que este no sea obvio en el certificado, p.e. tiempo de estabilización observado entre cargas y/o lecturas.

Acuerdos con el cliente p.e. 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

Las indicaciones y/o los errores para las cargas de prueba aplicadas o los errores relacionados a las indicaciones – como valores discretos y/o por una ecuación resultado de la 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 (o los errores) no han sido determinados por lecturas normales – lecturas únicas con la resolución normal del instrumento – se debería advertir que la incertidumbre declarada es más pequeña que la que se obtendría por 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 certificado 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:

$$W = R - E(R) \pm U(W) \tag{8.4-1}$$

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

Donde los errores están incluidos en la “incertidumbre global”, se puede utilizar la siguiente fórmula:

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

Se debería añadir la declaración de que la incertidumbre expandida asociada a los valores resultantes de la fórmula les corresponde un nivel de confianza de al menos el 95 %.

Opcional:
Donde aplique se puede hacer una declaración de conformidad con alguna especificación existente, y un intervalo de validez.

Esta declaración podría ser de la forma

$$W = R \pm Tol \qquad (8.4\text{-}3)$$

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 pesado[6]. 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 del objeto es

$$m = W\left[1 + \left(1/\rho - 1/\rho_c\right)\right] \tag{9.1-1}$$

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

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

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 $u(\rho)$ se puede reemplazar por $u(V)$ (*ambas relativas*).

9.2 Valor de masa convencional

El valor de masa convencional del objeto es

$$m_c = W\left[1 + (\rho_a - \rho_0)(1/\rho - 1/\rho_c)\right] \tag{9.2-1}$$

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

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

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] *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*,
first edition 1993, ISO (Geneva, Switzerland)

[2] *EA-4/02: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*,
edition 1, December 1999 (previously EAL-R2, with Supplements EAL-R2-S1, Nov. 1997, and EA-4/02-S2, May 1999)

[3] *OIML R111, Weights of Classes E_1, E_2, F_1, F_2, M_1, M_2, M_3,*
edition 1994

[4] *EN 45501: Metrological Aspects of Non-automatic Weighing Instruments*,
edition 1992 with supplement 1994

[5] *OIML R111, Weights of Classes E_1, E_2, F_1, F_2, M_1, M_{1-2}, M_2, M_{2-3}, M_3,*
Draft January 2004

[6] *OIML R 76: Non-automatic Weighing Instruments*
Part 1: Metrological Requirements - Tests,
edition 1992 with supplement 1994

[7] *Davis, R. S.: Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981/91).*
Metrologia 29 (1992), p. 67-70

[8] *M. Glaeser: Change of the apparent mass of weights arising from temperature differences*
Metrologia 36 (1999), p. 183-197

[9] *ISO 31 Quantities and Units (1993) Part 11: Mathematical Signs and Symbols for use in physical sciences and technology*

[10] *VIM, International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology,*
2nd edition 1994

[11] *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

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 BIPM [7]. 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 BIPM, versión exponencial

de [5], sección E3

$$\rho_a = \frac{0{,}34848\,p - 0{,}009 h_r \exp(0{,}062t)}{273{,}15 + t} \tag{A1.1-1}$$

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 BIPM, versión normal

Se puede citar esa expresión de [11]

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

con los símbolos anteriores.

La fórmula ofrece resultados con $\Delta\rho_{a,form} \leq 0{,}000\,5$ kg/m³ bajo las siguientes condiciones ambientales (no están incluidas las incertidumbres de medición de p, h_r, t):

p	$940 \text{ hPa} \leq p \leq 1\,080 \text{ hPa}$
h_r	$h_r \leq 80\ \%$
t	$20°\text{C} \leq t \leq 30°\text{C}$

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

$$\hat{w}^2(\rho_{a,form}) = (1\times10^{-4})^2 + ((0{,}000\ 5\ \text{kg/m}^3)/(1{,}2\ \text{kg/m}^3))^2\ /3$$

$$= 6{,}787\times10^{-8} \qquad \text{(A1.2-2)}$$

$$\hat{w}(\rho_{a,form}) = 2{,}61\text{x}10^{-4} \qquad \text{(A1.2-3)}$$

A1.3 Fórmula de Boyle-Mariotte

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

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

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:

$$\rho_a = 0{,}99265\frac{(1{,}20131kg/m^3)(293{,}15K)p}{(273{,}15+t)(1015hPa)} \qquad \text{(A1.3-2)}$$

que ofrece valores dentro de ± 1,2 % de los valores BIPM - vea A1.4 para la justificación y alcance de aplicación.

A1.4 Errores de fórmulas

Se realizaron una muestra de cálculos usando 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 BIPM considerando $x_{CO-2} = 0{,}0004$.

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 formula del BIPM, expresada en % del valor BIPM, fue

Fórmula ↓ →	Diferencia Máxima	mayor	menor
(A.1.1-1)		+ 0,004 %	- 0,164 %
(A.1.2-1)		+ 1,138 %	- 0,003 %

(A.1.3-1) Referencia ρ_a = 1,200 13 kg/m³	+ 1,932 %	- 0,450 %
(A.1.3-2), Referencia ρ_a = 1,192 48 kg/m³	+ 1,182 %	-1,181 %

Nota:

Para ρ_a = 1,200 13 kg/m³, los valores de referencia fueron t = 20°C, p = 1 014 hPa, y h_r = 50%.

En la última línea los valores de referencia fueron t = 20°C, p = 1 015 hPa, h_r = 50 % mientras que la densidad de aire de referencia fue ajustada arbitrariamente a

$$\rho_{a,ref} = (1{,}201\ 31\ \text{kg/m}^3)(1\text{-}0{,}735\%) = 1{,}192\ 48\ \text{kg/m}^3$$

para obtener una distribución entre + y – de las diferencias máximas contra los valores BIPM.

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 es recomendada en [5], fórmula E.8:

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

con p_0 = 101325 Pa

ρ_0 = 1,200 kg/m³

g = 9,81 m/s²

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

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

con $p(SL)$ = 1 013,12 hPa

Para cualquier lugar, la variación máxima es Δp = ± 40 hPa alrededor del promedio[7].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

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

[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)

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 debería aplicar algún criterio – p. ej.

$17°\text{C} \leq t \leq 27°\text{C}$ para una oficina o un laboratorio cerrados con ventanas,
$\Delta t \leq 5$ K para lugares sin ventanas en el centro de un edificio,
$-10°\text{C} \leq t \leq +30°\text{C}$ o $\leq +40°\text{C}$ 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;

en su defecto se debería aplicar algún criterio, – p. 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 debería 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

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

A3 Incertidumbre de la densidad del aire

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

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

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

c_p = 1,19x10^{-3} para presión barométrica (p , Δp en hPa)

c_t = - 4,5x10^{-3} para temperatura de aire (t en °C)

c_{hr} = -10,5x10^{-3} para humedad relativa (h_r como fracción decimal)

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

Δp /hPa	Δt /°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

[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 $c_t u(\Delta t)$

densidad que resulta de diferentes intervalos de temperatura – vea la tabla siguiente. De cualquier manera esta situación no es relevante para calibraciones normales.

Coeficientes de sensibilidad c_t para la densidad del aire

Las condiciones de referencia son: p = 101 4 hPa, t = 20ºC 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 BIPM para la densidad de aire
Coeficientes diferentes al derivado, son los coeficientes de la diferencia en ρ_a y la diferencia correspondiente en 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], sección 5.1

Se puede suponer una distribución normal cuando varios componentes de la incertidumbre (p. 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], sección 5.2

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 menos de 10 observaciones.
vea [2], sección 5.3

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 υ_{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], Apéndice E.

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, p. 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, S.8 – S.10)]
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 la distribución trapezoidal con $\beta < 0{,}95$:

(β = parámetro de lado, razón de lado menor al lado mayor del trapezoide)

$$k = \left\{1 - \sqrt{\left[0{,}05\left(1 - \beta^2\right)\right]}\right\} / \sqrt{\left[\left(1 + \beta^2\right)/6\right]}$$ - ver [2, (S10.13)]

para una distribución rectangular (β = 1): $k = 1{,}65$ – vea [2, (S9.14)]

para una distribución triangular (β = 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 $u_1(y)$, $u_2(y)$, p.e. 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 EN RELACIÓN CON 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 interpolación[10], 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

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

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

para una lectura R con $I_k < R < I_{k+1}$. Sería requerido 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”:

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

Con:

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

[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.

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:

$$\left|\min\chi^2 - \upsilon\right| \le \beta\sqrt{(2\upsilon)} \qquad \text{(C2.2-2)}$$

con

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

$\beta =$ factor elegido entre 1, 2 (valor que más aplicado), o 3,

se 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

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

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

El cálculo se realiza de mejor manera mediante cálculo matricial.

Sea

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

$\mathbf{U}(\mathbf{e})$ 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 $\mathbf{P}$ es

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

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

$$\mathbf{X}^\mathrm{T}\mathbf{PXa} - \mathbf{X}^\mathrm{T}\mathbf{Pe} = 0 \qquad \text{(C2.2-5)}$$

con la solución

$$\mathbf{a} = \left(\mathbf{X}^\mathrm{T}\mathbf{PX}\right)^{-1}\mathbf{X}^\mathrm{T}\mathbf{Pe} \qquad \text{(C2.2-6)}$$

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

$$\mathbf{v} = \mathbf{Xa} - \mathbf{e} \qquad \text{(C2.2-7)}$$

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

$$\min\chi^2 = \mathbf{v}^{\mathbf{T}}\mathbf{P}\mathbf{v} \tag{C2.2-8}$$

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

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

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 p. 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} j están incluidos en el vector

$$\mathbf{e}_{\mathbf{appr}} = \mathbf{X}\mathbf{a} \tag{C2.2-10}$$

con las incertidumbres calculadas por

$$u^2\left(E_{pprj}\right) = \mathrm{diag}\left(\mathbf{X}\mathbf{U}(\mathbf{a})\mathbf{X}^{\mathbf{T}}\right) \tag{C2.2-11}$$

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 $\left(1, R, R^2, R^3, \ldots R^{na}\right)^T$,

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

El error es

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

y la incertidumbre se obtiene mediante

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

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

$$\left(\mathbf{r}'^{\mathbf{T}}\mathbf{a}\right)\mathbf{U}(R)\left(\mathbf{r}'^{\mathbf{T}}\mathbf{a}\right)^{\mathbf{T}} = \left(a_1 + 2a_2 R + 3a_3 R^2 + \ldots + n_a a_{na} R^{na-1}\right)^2 u^2(R) \tag{C2.2-14}$$

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

Nota: Este método no es el mismo que el presentado en el Ejemplo H3 en [1]

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 $n_a = 1$:

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

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:

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

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 han sido determinados durante la calibración:

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

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 en muchas calculadoras normales de bolsillo.
La correspondencia entre los resultados es típicamente,

”intercepción”	$\Leftrightarrow$	a_0
”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)

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

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

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

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

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

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

(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

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

b) regresión lineal con a_0 = 0

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

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

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

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

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

c) promedio de gradientes

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

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

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

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

(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

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

C3 Términos sin relación con las lecturas

Mientras 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

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

con la desviación estándar

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

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

Cuando $\overline{E}$ es cercano a cero, sólo $s^2(E)$ debería ser añadido en (7.5.2-2a). En otros casos, en particular sí $|\overline{E}| \geq u(W)$, 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:

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

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

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

para ser insertado 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	

υ	número de grados de libertad	
ρ	Densidad	kg/m³
ρ_0	densidad de referencia del aire, ρ_0 = 1,2 kg/m³	kg/m³
ρ_a	densidad de aire	kg/m³
ρ_c	densidad de referencia de una pesa patrón, ρ_c = 8 000 kg/m³	kg/m³

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

D2 Ubicaciones 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 mj**		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 $\Delta I_{ecci} = I_i - I_1$	$\hat{w}(I_{ecc}) = \lvert \Delta I_{ecc,i} \rvert_{max} / (2L_{ecc}\sqrt{3})$	**6.3**; 7.1.1.4
Masa de referencia m_{ref} $m_{ref} = m_N + \delta m_c + \delta m_B + \delta m_D +$ δm_{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: $u^2(L_{Tn}) = n^2 u^2(m_{c1}) + 2\sum u^2(I_{j-1})\Big\vert_{j=1}^{n}$	$u(m_{ref})$ 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, Apend. A + E 7.1.2.3; 7.1.2.4 Apend. 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; Apend. C**
Incertidumbre expandida: $U(E) = ku(E)$con k = 2 (distribución normal) o $k \neq 2$		**7.3; Apend. B**

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

Cantidad	Componentes de la incertidumbre estándar	Secciones, subsecciones
Lectura por el usuario: $R = R_L + \delta R_{digL} + \delta R_{rep} - R_0$ $- \delta R_{dig0} (+ \delta R_{ecc})$ $u^2(R) = u^2(\delta R_{digL}) + s^2 + u^2(\delta R_{dig0})$	$u(I)$ como se indicó anteriormente, basado en d, no en d_T	**7.4** 7.4.1
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	$u(E_{cal}) = U(E_{cal})/k_{cal}$ $u[E_{appr}(R)] = f(R) = g(I)$ como se indicó anteriormente $u[E_{appr}(R)] = U[E(R)]/k_{cal}$	7.4 7.4.2
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	$u(W^*)$ 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
Incertidumbre expandida: $U(W^*) = ku(W^*)$ con k = 2 (distribución normal) ó $k \neq 2$ $U(W) = ku(W)$ con k = 2		7.5, Apend. B
Resultado de pesada con corrección: $W = R - E \pm U(W)$	$U(W)$ obtenida anteriormente	7.5.1

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

APÉNDICE E: INFORMACIÓN DEL EMPUJE DEL AIRE

Este Apéndice ofrece información adicional a la corrección por empuje de 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 E_2 a M_2 de la OIML (tomado de [5], Tabla B7).

Aleación/material	Densidad supuesta ρ en $\mathrm{kg/m^3}$	Incertidumbre estándar $u(\rho)$ en $\mathrm{kg/m^3}$
plata niquel	8 600	85
latón	8 400	85
acero inoxidable	7 950	70
acero al carbono	7 700	100
hierro	7 800	100
hierro fundido (blanco)	7 700	200
hierro fundido (gris)	7 100	300
aluminio	2 700	65

Para pesas con una cavidad de ajuste llena con una cantidad considerable de materiales de diferentes densidades, la referencia [5] 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 $0{,}4\ \mathrm{mg/kg}$ para los materiales normalmente utilizados para las pesas patrón 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			ρ_a = 1,2 kg/m³ con $u(\rho_a)$ menor que			
Material	ρ	$u(\rho)$	0,016	0,025	0,04	0,064
plata niquel	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			ρ_a = 1,2 kg/m³ con $u(\rho_a)$ menor que			
Material	ρ	$u(\rho)$	0,016	0,025	0,04	0,064
plata niquel	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			ρ_a = 1,2 kg/m³ con $u(\rho_a)$ menor que			
Material	ρ	$u(\rho)$	0,016	0,025	0,04	0,064
plata niquel	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 de aire para pesas conforme a R111

Como se ha citado en la nota al pie de 7.1.2.2, la R 111 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 especifica 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 E_2 a M_1.

Para pesas de $m_N \leq$ 50 g los mpe se encuentran en una Tabla de la R111, 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 de aire en una situación dada.

Tabla E2.2: Incertidumbre estándar para la corrección por empuje del aire para pesas patrón conforme a la R 111

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	$\hat{w}_A$	$\hat{w}_B$
$\geq$ 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 [8]. 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.

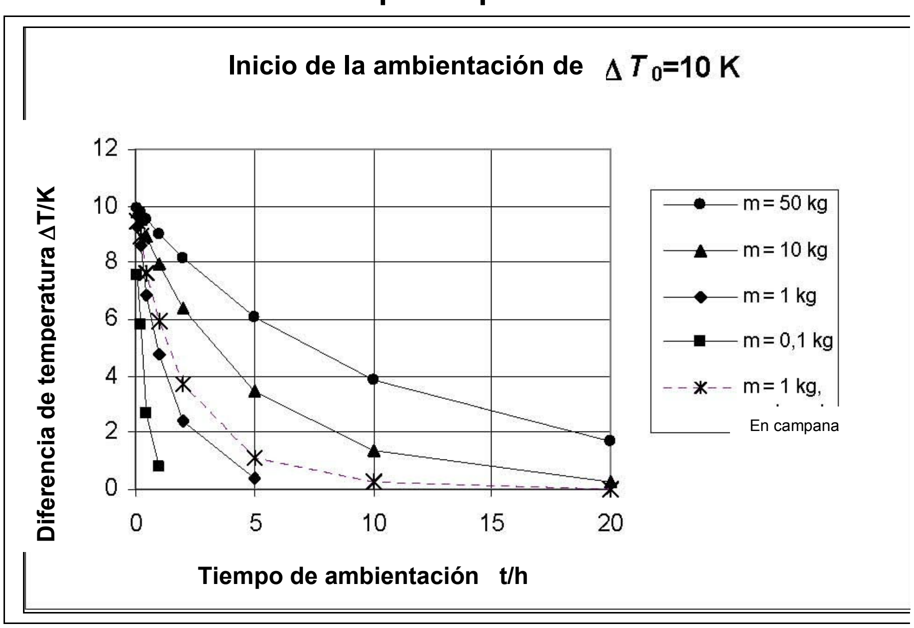
F1 Relación entre temperatura y tiempo

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 [8]: 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 kg" hasta"m = 50 kg"; en la tabla F1.3 para "m = 1 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 [8]: 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								
	$\Delta T / K$							
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								
	$\Delta T / K$							
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 [8]: 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 kg	20	15	10	7	5	3	2	1
50	113,23	87,06	60,23	43,65	32,27	20,47	14,30	7,79
20	49,23	38,00	26,43	19,25	14,30	9,14	6,42	3,53
10	26,43	20,47	14,30	10,45	7,79	5,01	3,53	1,96
5	14,30	11,10	7,79	5,72	4,28	2,76	1,96	1,09
2	6,42	5,01	3,53	2,61	1,96	1,27	0,91	0,51
1	3,53	2,76	1,96	1,45	1,09	0,72	0,51	0,29
0,5	1,96	1,54	1,09	0,81	0,61	0,40	0,29	0,17
0,2	0,91	0,72	0,51	0,38	0,29	0,19	0,14	0,08
0,1	0,51	0,40	0,29	0,22	0,17	0,11	0,08	0,05
0,05	0,29	0,23	0,17	0,12	0,09	0,06	0,05	0,03
0,02	0,14	0,11	0,08	0,06	0,05	0,03	0,02	0,01
0,01	0,08	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01

Los valores en esta tabla se pueden comparar contra la incertidumbre de calibración o contra una tolerancia dada para las pesas patrón que se utilizan para la calibración, con la intención de establecer si un valor actual de ΔT puede producir un cambio de masa aparente significante.

Como un ejemplo, la Tabla F2.2 muestra las diferencias de temperatura que

probablemente puedan producir, para pesas conforme con la R 111, los valores de Δm_{conv} que no exceden los límites especificados. La comparación está basada en la Tabla F2.1.
Los límites considerados son los errores máximos tolerados o 1/3 del mismo.

Al parecer en esos límites, el efecto de convección es relevante sólo para pesas de clases E_2 y F_1 de la R111.

Tabla F2.2 Límites de temperatura para valores específicos de Δm_{conv}

ΔT_A = diferencia de temperatura para $\Delta m_{conv} \leq mpe$

ΔT_B = diferencia de temperatura para $\Delta m_{conv} \leq mpe/3$

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

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 conocido, 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 Apéndice D2.

G1 Instrumento de 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**
$\boldsymbol{Max/d}$	**200 g / 0,1 mg**
Coeficiente de temperatura	$TC \leq 1{,}5x10^{-6}/K$ (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 °C ± 1 °C; h ≈ 300 m
receptor de carga	diámetro 80 mm
Cargas de prueba	**pesas patrón, clase E_2**

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 $\left\|\Delta I_{ecc}\right\|_{\max} = \mathbf{0{,}2\ mg}$

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**					
Digitalización $d_0/\sqrt{12}$	0,03 mg					rect
Digitalización $d_I/\sqrt{12}$	0,03 mg					rect
Excentricidad $\hat{w}_{ecc}(I)$	no relevante en este caso					rect
$u(I)$	0,14 mg					
Cargas de prueba m_N/g [11]	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
$u(\delta m_c) = mpe/(3\sqrt{3})$	0,03	0,03	0,03	0,04	0,06	rect
$\hat{w}(m_B)m_N = mpe/(4\sqrt{3})$	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	rect
.. $u(\delta m_{conv})$	no relevante en este caso					
Inc. del error $u(E)$	0,158	0,165	0,163	0,209	0,230	
υ_{eff}	12,2	14,6	13,7	37,4	54,5	
k(95%)	2,23	2,19	2,20	2,07	2,05	
U(E) = ku(E)	**0,35**	**0,36**	**0,36**	**0,43**	**0,47**	

[11] Clase E_2, calibrados hace 3 meses, deriva media registrada durante más de 2 recalibraciones en mas de de 12 meses $\left|D_{mc}\right| \leq mpe/3$; usados con el valor nominal; temperatura ambiente bien acondicionada, $\Delta T < 1$ K

adicional, opcional		
Aproximación por línea recta que cruza en cero	$E_{appr}(R) = 4{,}27\times10^{-6}R$	
Incertidumbre de los errores aproximados, $u(E_{appr})$	$u(E_{appr}) = \sqrt{(1{,}5x10^{-15}\,mg^2 + 5{,}5x10^{-13}\,R^2)}$ [12]	
Incertidumbre expandida $U(E_{appr})$	$U(E_{appr}) = 2\sqrt{(5{,}5x10^{-13}\,R^2)}$ $= 1{,}5x10^{-6}\,R$	

Sería aceptable mencionar en el certificado sólo el mayor valor de incertidumbre expandida para todos los errores declarados: $U(E)$ **= 0,47 mg**, basados en k **= 2,05 para** υ_{eff} **= 55**, acompañado por el comentario que la cobertura de probabilidad es por al menos 95 %.

El certificado 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 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 ± 1 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

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/55
Alternativa: citar resultados de la aproximación						
Error E_{appr}	$4{,}27\times10^{-6}\,R$					

[12] El primer término es insignificante!

$u(E_{appr})$	$0{,}742 \times 10^{-6} R$	
Repetibilidad s_R	0,13 mg	norm/5
Digitalización $d_0/\sqrt{12}$	0,03 mg	rect
Digitalización $d_R/\sqrt{12}$	0,03 mg	rect
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
Procedimiento de pesada: $\hat{w}(R_{ecc})$	$1{,}15 \times 10^{-6}$	rect
$\hat{w}(R_{tare})$	$1{,}20 \times 10^{-6}$	rect
$\hat{w}(R_{time})$	no relevante en este caso	
Incertidumbre del resultado de pesada $u(W)$	$u(W) = \sqrt{(0{,}01087 mg^2 + 4{,}07 x 10^{-12} R^2)}$	
υ_{eff}	> 30	
$k(95\%)$	2	
Incertidumbre del resultado de pesada con corrección por - E_{appr}		
$U(W) = ku(W)$	$U(W) = 2\sqrt{0{,}0187 mg^2 + 4{,}07 x 10^{-12} R^2}$	
simplificado al primer orden	$U(W) \approx U(W=0) + \left\{ \left[\begin{matrix} U(W = Max) - \\ U(W=0) \end{matrix} \right] \Big/ Max \right\} R$ $U(W) \approx 0{,}27 mg + 2{,}86 x 10^{-6} R$	
Incertidumbre global del resultado de pesada sin corrección a la lectura		
$U_{gl}(W) = U(W) + \lvert E_{appr}(R) \rvert$	$U_{gl}(W) = 0{,}27 mg + 7{,}13 x 10^{-6} R$	

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

“Bajo condiciones normales de uso, incluyendo

temperatura ambiente variando dentro de ± 1 K,

cargas aplicadas sin el cuidado especial de 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

$$W = R \pm \left(0{,}27mg + 7{,}1x10^{-6}R\right)$$

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 $R \geq 30$ mg,
dentro de una tolerancia de 0,1 % para $R \geq 280$ 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 tipo EC, 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; $17\ °C \leq T \leq 27\ °C$ reportado por el cliente
Coeficiente de temperatura	$TC \leq 2 \times 10^{-6}$/K (manual del fabricante)
dispositivo de ajuste integrado	no existente; $\lvert E(Max) \rvert \leq 10g$ (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)

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; $\left\|\Delta I_{ecc}\right\|_{\max} = 5$ **g**	

G2.3 Errores e incertidumbres relacionadas

Los cálculos siguen 7.1 hasta 7.3

Magnitud o Influencia	Carga, indicación en g Incertidumbre estándar en g, o su valor relativo						distribución/ grados de libertad
Indicación $I \approx m_N$/**kg**	**10**	**25**	**40**	**60**			
Error $Ecal$/**mg**	**0**	**-0,005**	**-0,010**	**-0,010**			
Indicación I_{Net}	**después de tarar la balanza a una precarga de 25 kg**				**10**	**20**	
Error $E_{Cal,Net}$					**-0,002**	**-0,005**	

Repetibilidad s	**1,10**	**2,74**			**1,10**	**2,74**	norm/4
Digitalización $d_0/\sqrt{12}$	0,58						rect
Digitalización $d_I/\sqrt{12}$	0,58	1,44	2,89	2,89	0,58	1,44	rect
Excentricidad $\hat{w}_{ecc}(I)$	No relevante para este caso						rect
$u(I)$	1,37	3,15	4,02	4,02	1,376	3,15	
Cargas de prueba [13]	10	20+5	2*20	3*20	(25+) 10	(25+) 20	
$u(\delta m_c) = mpe/\sqrt{3}$	0,29	0,72	1,15	1,73	0,29	0,58	rect
$u(\delta m_D) = mpe/(2\sqrt{3})$	0,14	0,36	0,58	0,87	0,14	0,29	rect
$u(\delta m_B) = \hat{w}(m_B)m_N$ =(2,6 mg/kg) m_N [14]	insignificante						rect
$u(\delta m_{conv})$	insignificante						
Inc. del error $u(E)$	1,40	3,25	4,22	4,46	1,40	3,21	
υ_{eff}	10,8	7,9	22,6	28,2	10,8	7,6	
k(95%)	2,28	2,36	2,12	2,1	2,28	2,4	
U(E) = ku(E)	**3,2**	**7,7**	**9,0**	**9,4**	**3,2**	**7,7**	
Aproximación, realizada con 4 indicaciones netas							
Aproximación por línea recta que cruza en cero	$E_{appr}(R) = -1{,}69x10^{-4}\,R$						
Incertidumbre de los errores aproximados, $u(E_{appr})$, para intervalos parciales de pesada (*PWR*)	*PWR 1*	$u(E_{appr}) = \sqrt{(5{,}4x10^{-8}\,g^2 + 2{,}63x10^{-9}\,R^2)}$ [15]					
	PWR 2	$u(E_{appr}) = \sqrt{(2{,}8x10^{-7}\,g^2 + 2{,}63x10^{-9}\,R^2)}$					
	PWR 3	$u(E_{appr}) = \sqrt{(4{,}6x10^{-7}\,g^2 + 2{,}63x10^{-9}\,R^2)}$					
$u(E_{appr})$, para los intervalos parciales de pesada (*PWR*) 1 a 3	$u(E_{appr}) = 5{,}13x10^{-5}\,R$						
Incertidumbre expandida, con k=2	$U(E_{appr}) = 2u(E_{appr}) = 10{,}3x10^{-5}\,R$						

13 Clase M_1, calibrados hace 8 meses, deriva media registrada durante más de 2 recalibraciones en mas de de 12 meses $|D_{mc}| \leq mpe/2$; usados con el valor nominal; temperatura ambiente bien acondicionada, $\Delta T < 1$ K

14 Para Δp =40 hPa, ΔT =10 K, $u(\rho_a)$=0,0207 kg/m^3 (de la tabla A3.1)

Con ρ =(7 950±70) kg/m^3, (7.1.2-7) resulta $\hat{w}(m_B) = 2{,}6$ mg/kg

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

Para facilitar la comparación las aproximaciones se repiten con las 6 indicaciones		
Aproximación por línea recta que cruza en cero	$E_{appr}(R) = -1{,}79x10^{-4}\,R$	
$u(E_{appr})$, para los intervalos parciales de pesada (PWR) 1 a 3	$u(E_{appr}) = 4{,}61x10^{-5}\,R$	
Incertidumbre expandida, con k=2	$U(E_{appr}) = 2u(E_{appr}) = 9{,}2x10^{-5}\,R$	
En Max, la primera aproximación resulta $E = -10{,}1$ g, $U(E_{`appr}) = 6{,}2$ g; la segunda aproximación resulta $E = -10{,}7$ g, $U(E_{`appr}) = 5{,}5$ g: las diferencias no son significantes. vea G2.5.1		

Sería aceptable mencionar únicamente el mayor valor de incertidumbre expandida para todos los errores declarados en el certificado: $\boldsymbol{U(E)} = \mathbf{4{,}2\ g}$, con $\boldsymbol{k} = \mathbf{2{,}1}$ para $\boldsymbol{\upsilon_{eff}} = \mathbf{28}$, acompañado del comentario de que la probabilidad de cobertura es mayor al 95 %.

El certificado 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 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 brutas o netas	$E_{appr}(R) = -1{,}79x10^{-4}R$			
Incertidumbre de los errores $u(E_{appr}(R))$	$u(E_{appr}) = 4{,}61x10^{-5}R$			
Incertidumbre de la lectura $u(R) = u(I)$	*PWR 1*	*PWR 2*	*PWR 3*	
	1,37	3,15	4,02	
Incertidumbre del error $u(E(R)) = \sqrt{\{u^2(R) + u^2(E_{appr})\}}$	*PWR 1*	$u(E(R)) = \sqrt{\{1{,}87g^2 + 2{,}13x10^{-9}R^2\}}$		
	PWR 2	$u(E(R)) = \sqrt{\{9{,}92g^2 + 2{,}13x10^{-9}R^2\}}$		
	PWR 3	$u(E(R)) = \sqrt{\{16{,}17g^2 + 2{,}13x10^{-9}R^2\}}$		
Influencias del instrumento				
Deriva de ajuste vea G2.5.2	$\hat{w}(R_{adj}) = 9{,}6x10^{-5}$			
Temperatura vea G2.5.3	$\hat{w}(R_{temp}) = 1{,}2x10^{-6}$			
Influencias del procedimiento de pesada				
Carga excéntrica	$\hat{w}(R_{ecc}) = 4{,}3x10^{-5}$			
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 $u(W)$	*PWR 1*	$u(W) = \sqrt{\{1{,}87g^2 + 13{,}2x10^{-9}R^2\}}$		
	PWR 2	$u(W) = \sqrt{\{9{,}92g^2 + 13{,}2x10^{-9}R^2\}}$		
	PWR 3	$u(W) = \sqrt{\{16{,}17g^2 + 13{,}2x10^{-9}R^2\}}$		
Incertidumbre del resultado de pesada corregido por E_{appr}				
Incertidumbre expandida $U(W) = ku(W)$, k=2	*PWR 1*	$U(W) = 2\sqrt{\{1{,}87g^2 + 13{,}2x10^{-9}R^2\}}$		
	PWR 2	$U(W) = 2\sqrt{\{9{,}92g^2 + 13{,}2x10^{-9}R^2\}}$		
	PWR 3	$U(W) = 2\sqrt{\{16{,}17g^2 + 13{,}2x10^{-9}R^2\}}$		
Simplificada al primer orden: $U(W) \approx U(Max_{i-1}) + \left\{\frac{[U(Max_i) - U(Max_{i-1})]}{Max_i - Max_{i-1}}\right\}R$	*PWR 1*	$U(W) \approx 2{,}7g + 9{,}5x10^{-5}R$		
	PWR 2	$U(W) \approx 6{,}9g + 1{,}64x10^{-4}(R - 12kg)$		
	PWR 3	$U(W) \approx 10{,}6g + 1{,}79x10^{-4}(R - 30kg)$		
Incertidumbre global del resultado de pesada sin la corrección a las lecturas				
	PWR 1	$U_{gl}(W) \approx 2{,}7g + 2{,}74x10^{-4}R$		

$U_{gl}(W) = U(W) + \|E_{appr}(R)\|$ también simplificada al primer orden	*PWR 1*	$U_{gl}(W) \approx 2{,}7g + 2{,}74x10^{-4} R$	
	PWR 2	$U_{gl}(W) \approx 6{,}9g + 3{,}43x10^{-4}(R - 12kg)$	
	PWR 3	$U_{gl}(W) \approx 10{,}6g + 3{,}58x10^{-4}(R - 30kg)$	

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

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

Alcance de pesada	Lectura R de	hasta:	Incertidumbre $U(W)$ del resultado de pesada W
PWR 1	0	12 kg	$\approx 2{,}7g + 2{,}74x10^{-4} R$
PWR 2	12 kg	30 kg	$\approx 6{,}9g + 3{,}43x10^{-4}(R - 12kg)$ $\approx 3g + 3{,}4x10^{-4} R$
PWR 3	30 kg	60 kg	$\approx 10{,}6g + 3{,}58x10^{-4}(R - 30kg)$ $\approx 3{,}6x10^{-4} R$

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 $R \geq 0{,}28$ kg,
dentro una tolerancia de 0,5 % para $R \geq 0{,}57$ kg,
dentro una tolerancia de 0,2 % para $R \geq 1{,}56$ kg,
dentro una tolerancia de 0,1 % para $R \geq 3{,}72$ 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 se debería considerar que con un instrumento con suficiente linealidad de la relación $I = f(m)$, la misma carga neta será indicada casi con el mismo error sin importar del valor de la tara equilibrada. La aproximación por una función lineal sin un desplazamiento, p. 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.

G.2.5.1 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

2,10 para ser evaluado contra el valor criterio de **9,66** para la primera aproximación, y
2,35 para ser evaluado contra el valor criterio de **12,93** 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

$$\hat{w}(R_{adj}) = |\Delta E(Max)| / (Max\sqrt{3}) = 9{,}6x10^{-5}$$

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 ΔT = 10 K. El coeficiente de temperatura del instrumento especificado por el fabricante es de $TC \leq 2\times10^{-6}$/K: Por lo tanto (7.4.3-1) queda

$$\hat{w}(R_{temp}) = 2x10^{-6}\, x10 / \sqrt{3} = 1{,}2x10^{-5}$$

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

G3.1 Condiciones específicas para la calibración

Instrumento:	**instrumento para pesar electrónico, descripción y identificación**, con aprobación de modelo tipo EC, 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 Max 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 ± 10 hPa**
Cargas de prueba	**Pesas patrón:** • **12 pesas cilíndricas laminadas, hierro fundido, de 500 kg cada una**, certificadas a tolerancia de clase M_1 de mpe = 25 g (OIML R111) **Cargas de sustitución hechas de acero o hierro fundido**: • 6 contenedores de acero llenos con acero o hierro fundido suelto, cada uno pesando ≈ 3 000 kg; • trailer para soportar los contenedores de acero, ajustado a pesar ≈ 6 000 kg; • Montacargas, pesando ≈ 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 ≈ 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 ≈ 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; 2/10 467 kg; 3/10 473 kg; 4/ 10 476 kg; 5/10 475 kg $\lvert \Delta I_{ecc} \rvert_{\max}$ **= 5 kg**	

G3.3 Errores y 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**					
Digitalización $d_{T0}/\sqrt{12}$	0,3					rect
Digitalización $d_{TI}/\sqrt{12}$	0,3					rect
Excentricidad $u(I_{ecc,ind}) = 6{,}9\text{x}10^{-5}\ I_j$ Fundamento: G3.5.2	0,4	0,8	1,2	1,7	2,1	rect
desplazamiento/histéresis $u(I_{time}) = 7{,}7\text{x}10^{-5} I_j$ 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[16] m_{c1}	6 000					

[16] Clase M_1, calibrados hace 3 meses, deriva media registrada durante 2 recalibraciones $\lvert D_{mc} \rvert \leq mpe$ durante 12 meses; utilizados en valor nominal; acondicionados a temperatura ambiente, ΔT < 5 K

$u(\delta m_c) = mpe/\sqrt{3}$	0,173	rect
$u(\delta m_D) = mpe/\sqrt{3}$	0,173	rect
$u(\delta m_B) = 9\text{x}10^{-6}\ m_{c1}$ [17]	0,054	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	
$u(\delta m_B) = 2{,}9x10^{-6} L_{sub}$ 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	4,75	6,92	8,78	10,58	triang. hasta normal
Incertidumbre de error $u(E) = \sqrt{\{u^2(I_j) + u^2(L_{Tj})\}}$	3,35	5,92	7,89	9,71	11,51	
υ_{eff}	4	42	> 100			
k (95%)	2,87	2,04	2	2	2	
$\boldsymbol{U(E) = ku(E)}$	**9,6**	**12,1**	**15,8**	**18,4**	**23,0**	
adicional, opcional:						
Resultados de la aproximación por línea recta que cruza por cero	$E_{appr}(R) = 0{,}00019R$					
Incertidumbre de los errores aproximados	$u(E_{appr}(R)) = \sqrt{(9{,}4x10^{-7} kg^2 + 3{,}93x10^{-8} R^2)}$ [18]					
Incertidumbre expandida, con k = 2	$U(E_{appr}(R)) = 2u(E_{appr}(R)) = 7{,}9x10^{-4} R$					

El certificado debería aconsejar al usuario de que cualquier lectura R obtenida después de la calibración se debería corregir 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 se deberá incrementar al sumar la incertidumbre estándar de la lectura, $u(R) = \sqrt{(2d^2/12 + s^2)} = 5{,}25$ kg.

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

[17] Valor de tabla E2.1 para la fundición de hierro gris: $\rho = (7\ 100 \pm 300)$ kg/m³, $u(\rho_a)$=0,064 kg/m³, $\hat{w}(m_B) = 9\text{x}10^{-6}$

[18] El primer término es despreciable

Podría ser aceptable declarar en el certificado sólo el mayor valor de incertidumbre expandida para todos los errores registrados: $U(E) = $ **23 kg, o** $U(E_d) = $ **25 kg** con k **= 2**, acompañado del comentario de que la probabilidad de cobertura es por lo menos el 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 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 °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

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 $u(E(R))$	$u(E(R)) = \sqrt{\{(5{,}24kg)^2 + 3{,}93x10^{-8} R^2\}}$	
Contribuciones adicionales a la incertidumbre		
Instrumento para pesar		
Deriva del ajuste: cambio de $E(Max)$ durante 1 año = 15 kg	$\hat{w} = (R_{adj}) = 15/(30000\sqrt{3}) = 2{,}89x10^{-4}$	rect
Temperatura: $\hat{w}(R_{temp}) = TCx\,\Delta T/\sqrt{12}$	$2x10^{-6}\,x\,40/\sqrt{12} = 0{,}23x10^{-4}$	rect
Procedimiento de pesaje		
Excentricidad de carga: $\hat{w}(R_{ecc})\lvert\Delta I\rvert_{\max}/(L_{ecc}\sqrt{3})$	$5/(10470\sqrt{3}) = 2{,}76x10^{-4}$	rect

Tarar: la no linealidad de los errores es menor que su incertidumbre estándar!	-----	rect
Repeticiones: $u(I_{time})$ aplica para el alcance de pesada completo, vea G3.5.3	$\hat{w}(R_{time}) = 0{,}77x10^{-4}$	rect.
Incertidumbre del resultado de pesada $u(W)$	$u(W) = \sqrt{(5{,}24kg)^2 + \begin{pmatrix} 3{,}93 + 8{,}35 + 0{,}05 \\ + 7{,}60 + 0{,}59)x10^{-8} R^2 \end{pmatrix}}$ $u(W) = \sqrt{(5{,}24kg)^2 + 16{,}6x10^{-8} R^2}$	
k (95%)	2	
Incertidumbre del resultado de pesada corregida por E_{appr}		
$U(W) = ku(W)$	$U(W) = 2\sqrt{(5{,}24kg)^2 + 16{,}6x10^{-8} R^2}$	
simplificada al primer orden	$U(W) \approx U(W=0) + \left\{ \begin{bmatrix} U(W = Max) \\ - U(W = 0) \end{bmatrix} \Big/ Max \right\} R$ $U(W) \approx 10{,}5kg + 5{,}4x10^{-4} R$	
Incertidumbre global para resultado de pesada sin corrección a la lectura		
$U_{gl}(W) = U(W) + \lvert E_{appr}(R) \rvert$	$U_{gl}(W) = 10{,}5kg + 7{,}3x10^{-4} R$	

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

"Bajo condiciones normales de uso, incluyendo

temperatura ambiente variando entre -10 °C y $+ 30$ °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

$$W = R \pm (10{,}5kg + 7{,}3x10^{-4} R)$$

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 $R \geq 1\,130$ kg,
dentro de una tolerancia de 0,5 % para $R \geq 2\,450$ kg,

dentro de una tolerancia de $0{,}2\%$ para $R \geq 8\ 200$ 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 $\Delta I_j \leq 20$ kg (ahorra tiempo comparado con el ajuste a $\Delta I \leq 1$ kg).

Todas las indicaciones en alta resolución $d_T = 1$ 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 kg de pesas patrón
más la carga de sustitución acumulada L_{Tj-1}

$E_j = I_j - L_{Tj}$

I'_j indicación después de quitar m_{c1}

$I(L_{subj})$ indicación después de añadir ≈ 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}	I_j	E_j	I'_j	$I(L_{subj})$	ΔI_j	L_{subj}
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 $1\ \mathrm{m}$ y en lo ancho $0{,}4\ \mathrm{m}$. 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

$$\hat{w}\left(I_{ecc,ind}\right) = \left|\Delta I_{ecc}\right|_{\max} \Big/ \left(2 L_{ecc} \sqrt{3}\right)$$

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): $\hat{w}\left(I_{time}\right) = E_0 \Big/ \left(Max\sqrt{3}\right)$
da un valor de

$$\hat{w}\left(I_{time}\right) = 4 \Big/ \left(30000\sqrt{3}\right) = 7{,}7\text{x}10^{-5}$$

el cual se debería añadir a la incertidumbre de la indicación de todas las cargas excepto a la primera carga de $6\ 000\ \mathrm{kg}$ la cual consiste solo de pesas patrón.

La misma incertidumbre se añade 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 maquinaría (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 $\Delta\rho_a = 0{,}036\ 2$ kg/m³

el cambio máximo del empuje de aire de las cargas de sustitución por lo tanto sería

$$\Delta m_{sub,B} \approx L_{sub} \Delta\rho_a / \rho = 24\ 000 \times 0{,}036\ 2 / 7\ 500 = 0{,}12 \text{ kg}$$

dando una incertidumbre relativa de

$$\hat{w}(\delta m_{sub,B}) = \Delta m_{sub,B} / \left(L_{sub}\sqrt{3}\right) = 2{,}9 \text{ x } 10^{-6}$$

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	**6 000**	**12 000**	**18 000**	**24 000**	**30 000**	
Errores redondeados a d	**0**	**0**	**0**	**10**	**10**	
$u(R)$	5,25					
$u(W^*) = \sqrt{u^2(R) + u^2(E)}$	6,22	7,91	9,47	11,03	12,65	
υ_{eff}	25	> 60				
$k(95\%)$	2,11	2				
$\boldsymbol{U(W^*) = ku(W^*)}$	**13,1**	**15,8**	**18,9**	**22,1**	**25,3**	
Resultado de la aproximación por línea recta que cruza por cero	$E_{appr}(R) = 0{,}00019R$					
Incertidumbre de W^*	$u(W^*) = \sqrt{(5{,}25kg)^2 + 3{,}93x10^{-8} R^2}$					
Incertidumbre expandida, con k = 2	$U(W^*) = 2u(W^*)$					