

INDICE

| | Página |
|--|---------------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 2 |
| 2. ALCANCE | 2 |
| 3. TERMINOLOGÍA Y SÍMBOLOS | 3 |
| 4. ASPECTOS GENERALES DE LA CALIBRACIÓN | 3 |
| 4.1. Elementos de la calibración..... | 3 |
| 4.1.1. Alcance de calibración | 3 |
| 4.1.2. Lugar de calibración..... | 4 |
| 4.1.3. Condiciones previas, preparaciones | 4 |
| 4.2. Instrumento de control | 4 |
| 4.3. Carga de prueba e indicación | 5 |
| 4.3.1. Relación básica entre la carga y la indicación..... | 5 |
| 4.3.2. Efecto del empuje del aire | 5 |
| 4.3.3. Efectos de la convección..... | 6 |
| 4.3.4. Valor de referencia de la masa | 6 |
| 4.4. Cargas de prueba..... | 7 |
| 4.4.1. Patrones de masa | 7 |
| 4.4.2. Otras cargas de prueba..... | 7 |
| 4.5. Indicaciones en dinámico | 9 |
| 4.5.1. Generalidades..... | 9 |
| 4.5.2. Resolución | 9 |
| 5. MÉTODOS DE MEDIDA | 9 |
| 5.1. Instrumentos que pueden pesar en estático | 9 |
| 5.2. Ensayos en funcionamiento automático | 9 |
| 5.2.1. Prueba de error y repetibilidad | 9 |
| 5.2.2. Prueba de excentricidad | 10 |
| 5.2.3. Mediciones auxiliares | 11 |
| 6. RESULTADOS DE MEDIDA | 11 |
| 6.1. Repetibilidad | 11 |
| 6.2. Errores de indicación en dinámico | 11 |
| 6.2.1. Valores discretos | 11 |
| 6.3. Efecto de la carga descentrada | 12 |
| 6.4. Parámetros de funcionamiento..... | 12 |
| 7. INCERTIDUMBRE DE MEDIDA | 12 |
| 7.1. Incertidumbre típica de los valores discretos | 12 |
| 7.1.1. Incertidumbre típica de la indicación en la seleccionadora ponderal | 13 |
| 7.1.2. Incertidumbre típica del patrón de masa | 14 |
| 7.1.3. Incertidumbre de la desviación en el instrumento de control. | 18 |
| 7.1.4. Incertidumbre típica del error | 18 |
| 7.2. Incertidumbre expandida en la calibración | 19 |
| 7.3. Incertidumbre del resultado de las pesadas en condiciones de uso | 19 |
| 7.3.1. Incertidumbre de la lectura en condiciones de uso | 20 |
| 7.3.2. Incertidumbre típica del error | 21 |
| 7.3.3. Incertidumbre expandida de un resultado de pesada..... | 21 |
| 8. CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN | 22 |
| 8.1. Información general | 22 |
| 8.2. Información sobre el procedimiento de calibración | 22 |
| 8.3. Resultados de medida | 23 |
| 8.4. Información adicional:..... | 23 |
| 9. REFERENCIAS | 24 |

RECOMENDACIONES SOBRE LA ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE
FACTOR DE COBERTURA k PARA LA INCERTIDUMBRE *EXPANDIDA* DE MEDIDA
FORMULAS QUE DESCRIBEN LOS ERRORES EN RELACIÓN A LAS INDICACIONES

ANEXO IV: SÍMBOLOS Y TÉRMINOS

INFORMACIÓN SOBRE EL EMPUJE DEL AIRE

ANEXO VI: EFECTOS DE LA CONVECCIÓN

ANEXO VII: EL EMPUJE DEL AIRE Y LA DETERMINACIÓN DE LAS MASAS DE TRANSFERENCIA EN LA CALIBRACIÓN DE SELECCIONADORAS PONDERALES

ANEXO VIII: EJEMPLOS

1. INTRODUCCIÓN

Los instrumentos de pesaje de funcionamiento automático (IPFA) se utilizan ampliamente para determinar la magnitud de una carga en términos de masa. Mientras que para algunas aplicaciones especificadas por la legislación están sujetos al control metrológico legal, hay una necesidad creciente de confirmación de sus cualidades metrológicas mediante calibración, por ejemplo, cuando lo requieren las normas ISO 9001 o ISO/IEC 17025.

Este documento ha sido elaborado por el Subcomité Técnico de Calibración nº 4 (Masa y Volumen) de ENAC y está basado en la guía G-ENAC-13 [10].

2. ALCANCE

Este documento contiene orientaciones para la calibración tanto estática como dinámica de instrumentos de pesaje de funcionamiento automático de indicación automática (a partir de ahora llamados "instrumento"), en particular en lo que se refiere a

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

La calibración en estático (modo no automático) se realizará según G-ENAC-13. Esta guía solamente contiene las particularizaciones necesarias. La calibración en dinámico (modo automático) es la que se trata detalladamente en esta guía.

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

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

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

Cualquiera de estos procedimientos debe incluir, para un número limitado de cargas de prueba, la determinación del error de indicación y de la incertidumbre de medida asignada a estos errores. El procedimiento debe parecerse tanto como sea posible a las operaciones de pesaje que el usuario realiza rutinariamente.

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

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

1. laboratorios de calibración acreditados para la calibración de instrumentos de pesaje de funcionamiento automático,
2. fabricantes y otros usuarios de instrumentos de pesaje de funcionamiento automático calibrados para realizar mediciones relacionadas con la calidad de producción según requisitos de gestión de calidad (por ejemplo, serie ISO 9000, ISO 10012, ISO/IEC 17025)

3. TERMINOLOGÍA Y SÍMBOLOS

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

- GUM [1] para los términos relacionados con la determinación de los resultados y la incertidumbre de medida,
- OIML R111 [4] para los términos relacionados con las pesas patrón,
- OIML R51 [2] para los términos relacionados con el funcionamiento, la construcción y la caracterización metrológica de los instrumentos de pesar de funcionamiento automático,
- VIM [8] para los términos relacionados con la calibración,
- G-ENAC-13 [10] para los términos relacionados con el pesaje.

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

Los símbolos cuyo significado no sea evidente, serán explicados cuando sean utilizados por primera vez. Los que se usan en más de una sección se recogen en el Anexo IV apartado 1.

En el Anexo IV apartado 2 se da un listado de los principales términos y ecuaciones utilizados en este documento.

4. ASPECTOS GENERALES DE LA CALIBRACIÓN

4.1. Elementos de la calibración

La calibración consiste en

1. aplicar cargas de prueba al instrumento bajo condiciones especificadas,
2. determinar el error o variación de la indicación,
3. determinar el valor medio y la desviación típica, y
4. estimar la incertidumbre de medida que se atribuye a los resultados

4.1.1. Alcance de calibración

El cliente puede especificar una cierta parte del campo de pesaje, limitado por una carga mínima *Min'* y una carga máxima a pesar *Max'*, o cargas nominales individuales, para las que solicita la calibración. La calibración debería extenderse al campo de pesaje completo [3] desde *Min* al alcance máximo *Max*, teniendo en cuenta los efectos dinámicos.

La calibración se realizará para las cargas/productos y las velocidades solicitadas por el cliente y solamente será válida para estas condiciones.

4.1.2. Lugar de calibración

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

4.1.3. Condiciones previas, preparaciones

No debería realizarse la calibración a menos que:

1. el instrumento pueda identificarse fácilmente,
2. todas sus funciones estén libres de efectos de la contaminación o daños, y todas las funciones esenciales para la calibración operen satisfactoriamente,
3. la presentación de los valores de peso no sea ambigua y las indicaciones que se den sean de fácil lectura,
4. las condiciones normales de uso (corrientes de aire, vibraciones, estabilidad del puesto de pesaje, etc.) sean adecuadas al instrumento a calibrar,
5. el instrumento haya estado alimentado eléctricamente antes de la calibración durante un período adecuado, por ejemplo el plazo de calentamiento establecido para el instrumento,
6. el instrumento está nivelado, si corresponde,
7. el instrumento ha sido sometido a una carga aproximadamente igual a la carga máxima de prueba, una vez como mínimo, o, recomendablemente, de manera repetida.
8. en el caso de los instrumentos que permiten la introducción manual o automática de un factor de corrección de peso dinámico, con medios disponibles por el usuario, deberán ser ajustados a las condiciones en que se realice la calibración, que han de ser indicadas por el cliente. Dichos ajustes deben realizarse con los medios aplicados normalmente por el cliente y siguiendo las instrucciones del fabricante cuando estén disponibles.

Debe registrarse, en la medida en que son relevantes para los resultados de la calibración, el estado de los parámetros de configuración del software que pueden ser alterados por el cliente.

Los instrumentos equipados con dispositivos de seguimiento de cero o de puesta a cero automática [2] [3] deberían calibrarse con el dispositivo en marcha o no, según establezca el cliente. Si no se dice lo contrario, se hará en las condiciones habituales de funcionamiento.

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

4.2. Instrumento de control

Se dispondrá de un instrumento de control, que se utilizará para determinar el valor convencionalmente verdadero de la masa de una carga de ensayo.

El instrumento de control puede ser un instrumento diferente al sometido a ensayo o el mismo instrumento bajo ensayo cuando éste dispone de un modo de pesaje en estático con la exactitud necesaria.

En el caso de ser un instrumento diferente del sometido a ensayo, el instrumento de control deberá tener una resolución mejor o igual que la del instrumento sometido a ensayo y deberán realizarse sobre el instrumento de control las pruebas necesarias que permitan determinar la incertidumbre de las cargas de prueba, que deberá ser adecuada a la incertidumbre de calibración esperada del equipo, en base a la documentación de referencia (G-ENAC-13 u OIML R 111).

Si la calibración del instrumento de control no se realiza conjuntamente con la calibración del instrumento, se deberá tener en cuenta una contribución adicional a la incertidumbre del instrumento de control asociada a la variación de ajuste y variación con la temperatura según se indica en el anexo VII.

En caso de traslado del instrumento deben tenerse en cuenta los aspectos relevantes de G-ENAC-13 y G-ENAC-17.

4.3. Carga de prueba e indicación

4.3.1. Relación básica entre la carga y la indicación

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

$$I \sim m \times g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho} \right) \quad (4.3.1-1)$$

| | | |
|-----|----------|----------------------------------|
| con | g | aceleración local de la gravedad |
| | ρ_a | densidad del aire ambiente |
| | ρ | densidad del objeto |

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

4.3.2. Efecto del empuje del aire

Para saber cómo afecta el efecto del empuje del aire en estos ensayos, se puede consultar la guía G-ENAC-13 y el anexo V del presente documento.

4.3.2.1. Ensayos estáticos. Pesas patrón

Cuando se ensaya el instrumento en estático, se usarán pesas patrón calibradas en términos de la masa convencional m_c .

En el uso de pesas patrón conforme a OIML R 111 el efecto del empuje del aire no es mayor de 11 mg/kg a partir de 100 g de clases E y F, y es despreciable para las pesas de clases M frente al mpe de las pesas (caso B2 de G-ENAC-13).

4.3.2.2. Ensayos dinámicos. Masas de transferencia

Cuando se ensaya el instrumento en dinámico se usarán masas de transferencia que en general no serán pesas patrón, y además de una densidad considerablemente inferior.

Cuando la determinación del valor de la masa de transferencia se realiza en las mismas condiciones ambientales que la calibración del instrumento y se comparan directamente los valores indicados en el instrumento de control y el instrumento a calibrar los efectos del empuje del aire se cancelan.

En el caso de masas de transferencia de una densidad de 1000 kg/m³ el efecto del empuje del aire puede llegar a ser orden de 120 mg/kg en algunos casos.

4.3.3. Efectos de la convección

Los efectos de la convección se deben minimizar permitiendo a las pesas de referencia y masas de transferencia alcanzar la temperatura del entorno. Pueden ser relevantes para pesas de referencia de clase E₂ y F₁ (ver G-ENAC-13 y Anexo VI).

4.3.4. Valor de referencia de la masa

En el caso dinámico, para determinar los errores de indicación de un instrumento se aplican masas de transferencia de una masa convencional desconocida m_{cTra} . Su densidad ρ_{Tra} es, normalmente, diferente del valor de referencia ρ_c , y la densidad del aire ρ_{a2Tra} en el momento de la calibración de la seleccionadora es, normalmente diferente de ρ_0 .

El error de indicación E es

$$E = I - m_{ref} \quad (4.3.4-1)$$

donde m_{ref} es una masa convencional, llamada posteriormente valor de referencia de la masa. Debido a los efectos de empuje del aire, convección, deriva y otros que pueden comportar términos menores de corrección δm_x , m_{ref} no es exactamente igual a m_{cTra} :

$$m_{ref} = m_{cTra} + \delta m_{B2} + \delta m_{conv} + \delta m_{...} \quad (4.3.4-2)$$

Si se consideran solamente aquellos a los que no se atribuye una esperanza matemática nula, y se especifica para la seleccionadora ponderal con el subíndice 2, se obtiene

$$m_{\text{ref}2} = m_{\text{cTra}} + \delta m_{\text{B}2} \quad (4.3.4-3)$$

4.4. Cargas de prueba

Las cargas de prueba deberían consistir, preferiblemente, en masas patrón trazables a la unidad SI de masa para los ensayos en estático y otras cargas de prueba, adaptadas al uso previsto del instrumento, para los ensayos en dinámico.

4.4.1. Patrones de masa

Tanto en la calibración en estático del instrumento ensayado como en la calibración del instrumento de control, se usarán masas patrón con clase de precisión adecuada a las características de los instrumentos ensayados.

La trazabilidad de las masas que se usarán como patrones debe conseguirse por una calibración que consista en la

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

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

3. densidad ρ_s suficientemente cercana a $\rho_c = 8000 \text{ kg/m}^3$
4. un acabado superficial adecuado para prevenir un cambio de masa a través de la contaminación por suciedad o capas de adhesión
5. propiedades magnéticas tales que se minimice la interacción con el instrumento a calibrar.

Las pesas que cumplen con las especificaciones pertinentes de la Recomendación Internacional OIML R 111 [3] deberían cumplir estos requisitos.

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

4.4.2. Otras cargas de prueba

Hay que particularizar para el caso en el que el cliente proporcione las cargas y el laboratorio tenga que usar un producto simulado.

Para los ensayos en dinámico en que no se determinan errores de indicación, no es esencial que se conozca la masa convencional de la carga de prueba. En estos casos, se pueden usar cargas que no sean patrones de masa, considerando debidamente los siguientes aspectos:

1. forma, material, composición que debería permitir un fácil manejo,
2. forma, material, composición que debería permitir estimar fácilmente la posición del centro de gravedad,
3. su masa debe permanecer constante durante todo el período en que se usan para la calibración,

Para los ensayos en dinámico en que se determinan errores de indicación, se utilizan masas de transferencia adecuadas al uso previsto del instrumento, que no son patrones de masa, considerando debidamente los siguientes aspectos:

1. forma, material, composición que debería permitir un fácil manejo,
2. forma, material, composición que debería permitir estimar fácilmente la posición del centro de gravedad,
3. su masa debe permanecer constante durante todo el período en que se usan para la calibración,

y, si no se determina su masa en el mismo momento de la calibración de la seleccionadora,

4. su densidad debería ser fácil de estimar,
5. las cargas de baja densidad (por ejemplo, cajas de cartón rellenas con material, papel, etc.) pueden requerir una especial atención debido al empuje del aire. Puede ser necesario el seguimiento de la temperatura y la presión atmosférica durante todo el período de uso de las cargas durante la calibración.

Estas cargas de prueba se *calibrarán*, o “in situ” mediante el instrumento de control, o en el Laboratorio Permanente. Aquí se tratará el caso en que se calibran in situ. La justificación de la ecuación y los otros casos se tratan en el Anexo VII.

Los términos de empuje quedan como

$$\delta m_{BTot} = -m_N (\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{Cal}} - \frac{1}{\rho_c} \right) \quad (4.4.2-1)$$

que es exactamente la misma expresión (G-ENAC-13, 4.2.4-4) que obtendríamos si la calibración de la seleccionadora ponderal se hubiese realizado con las mismas pesas patrón que se han utilizado para la calibración del instrumento de control, en lugar de hacerlo con la masa de transferencia. Por lo tanto, cuando todas las operaciones de ajuste y pesaje se realizan en el mismo momento de la calibración de la seleccionadora, no es preciso conocer la densidad de la masa de transferencia y no aporta ninguna contribución al empuje del aire, ni a su incertidumbre. Y 4.4.2-2 queda como:

$$m_{ref2} = R_L - R_0 - I_{L1} + I_{01} + m_N - m_N (\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{Cal}} - \frac{1}{\rho_c} \right) \quad (4.4.2-2)$$

Para la *calibración* de estas cargas de prueba en el instrumento de control, se utilizará alguno de los procedimientos indicados en el anexo VII.

La prueba se realiza con varias cargas de prueba L_{Tj} que deberían seleccionarse de manera que:

- sean valores cercanos a las cargas de utilización del instrumento, o
- seleccionando valores de cargas de ensayo que incluyan, por ejemplo, los valores de alcance máximo, alcance mínimo y valores cercanos, pero no superiores, de los puntos críticos entre el alcance máximo y el alcance mínimo.

4.5. Indicaciones en dinámico

4.5.1. Generalidades

En general, en este tipo de instrumentos, al no poderse visualizar el cero, sólo se tendrá en cuenta la indicación bajo carga.

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

4.5.2. Resolución

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

5. MÉTODOS DE MEDIDA

5.1. Instrumentos que pueden pesar en estático

La calibración en estático se realizará como si fuera un instrumento de pesaje de funcionamiento no automático, de acuerdo a lo indicado en la guía G-ENAC-13.

5.2. Ensayos en funcionamiento automático

Normalmente se realizan pruebas para cada carga/producto y velocidad acordados con el cliente para determinar los errores y la repetibilidad de las indicaciones. El efecto sobre la indicación de la aplicación descentrada de una carga se realizará cuando sea aplicable, en el caso más desfavorable respecto a la carga/producto.

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

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

5.2.1. Prueba de error y repetibilidad

La prueba consiste en hacer pasar de forma repetida la misma carga por el receptor de carga, en la medida de lo posible, bajo condiciones idénticas de manejo de la carga y del instrumento, y bajo condiciones de prueba constantes.

Cada carga de prueba debe consistir en un solo cuerpo, y ha de haber sido calibrada previamente con el instrumento de control.

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

Antes de la prueba se debe ajustar el valor de cero (si es posible), seleccionar la velocidad del sistema de transporte de carga a cada valor especificado por el cliente y, cuando proceda, seleccionar el factor de corrección dinámico correspondiente. Se ha de permitir que los ajustes automáticos de cero estén operativos (si existen).

Se introduce el artículo en el receptor de carga, preferiblemente usando el transportador del propio instrumento, haciendolo pasar por el receptor.

El número de ensayos por valor de carga de ensayo será al menos las especificadas en el siguiente cuadro:

| Carga de ensayo | Número de ensayos |
|--------------------------|-------------------|
| $m \leq 10$ kg | 30 |
| 10 kg < $m \leq 20$ kg | 20 |
| 20 kg < m | 10 |

5.2.2. Prueba de excentricidad

Ajustar el cero si fuese necesario. Permitir que los ajustes automáticos de cero estén operativos.

Seleccionar la carga de ensayo más desfavorable de entre las utilizadas en 5.2.1 (la más pesada que sea compatible con la siguiente figura) y hacerla pasar por el receptor de carga tal como se muestra a continuación:



En el dibujo la letra W representa el ancho de la banda cuando no existen guías o el ancho entre guías cuando éstas existen.

El número de pasadas en cada posición vendrá dada por la siguiente tabla:

| Carga de ensayo | Número de pasadas |
|--------------------------|-------------------|
| $m \leq 10$ kg | 10 |
| 10 kg < $m \leq 20$ kg | 6 |
| 20 kg < m | 3 |

Este ensayo no se realizará cuando la carga no pueda aplicarse de forma excéntrica sobre el receptor de carga por la naturaleza y forma del artículo o por el diseño del receptor de carga, por ejemplo por la existencia de guías que se adaptan al ancho del artículo.

5.2.3. Mediciones auxiliares

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

Considerando los efectos de empuje del aire – ver 4.2.2:

Debería medirse la temperatura del aire razonablemente próximo al instrumento, como mínimo una vez durante la calibración. Cuando un instrumento se utiliza en un ambiente controlado, debería anotarse el margen de variación de la temperatura, por ejemplo a partir de un gráfico, de las posiciones de los mandos del dispositivo de control, etc.

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

6. RESULTADOS DE MEDIDA

Las fórmulas de los capítulos 6 y 7 pretender servir como elementos de un esquema normalizado para una evaluación equivalente de los resultados de las pruebas de calibración en dinámico. Cuando se aplican sin modificaciones hasta donde son aplicables, no es necesaria ninguna descripción ulterior de la evaluación.

No se pretende que se utilicen todas las formulas, símbolos e índices para presentar los resultados en un Certificado de Calibración.

En esta sección se utiliza la definición de una indicación I dada en 4.3.

6.1. Repetibilidad

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

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

con

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

Cuando solamente se ha aplicado una carga de prueba, puede omitirse el índice j .

6.2. Errores de indicación en dinámico

6.2.1. Valores discretos

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

$$E_j = I_j - m_{\text{ref}2,j} \quad (6.2-1)$$

En general, la indicación I_j será la media de más de una lectura, de forma que se entiende que I_j es el valor medio según (6.1-2).

$m_{\text{ref}2}$ es el valor obtenido según (4.4.2-2)

6.3. Efecto de la carga descentrada

A partir de las indicaciones I_i obtenidas en las diferentes posiciones de la carga según 5.2.2, se calculan las diferencias ΔI_{ecc}

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

Siendo I_i la media de las indicaciones en cada una de las bandas ensayadas, e I_1 la media del ensayo en el punto central determinada según el apartado 5.2.1.

6.4. Parámetros de funcionamiento

Deben determinarse las dimensiones del artículo, la longitud de plataforma y la velocidad de la cinta y se anotará la configuración de velocidad (velocidad /cadencia indicada o posición del selector) para cada caso. A partir de la velocidad de la cinta v , y la longitud de la plataforma L , se calculará una cadencia máxima c_{max} de acuerdo con la siguiente expresión:

$$c_{max} = v/L \quad (6.4-1)$$

Las dimensiones del artículo se darán de la forma normalizada siguiente $a \times b \times c$ siendo

- a , longitud, en la dirección de avance de la cinta
- b , anchura, perpendicular a la longitud en el plano de la cinta
- c , altura, perpendicular al plano de la cinta.

7. INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

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

Por ejemplo: sea

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

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

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

Por ello, la varianza correspondiente se denotará por $\hat{w}^2(m_{corr})$, y la incertidumbre expandida relativa se denotará por $\hat{W}(m_{corr})$.

7.1. Incertidumbre típica de los valores discretos

La ecuación básica de la calibración es

$$E = I - m_{ref} = I - m'_{ref} + \Delta I_C \quad (7.1-1)$$

donde ΔI_C es la desviación en el instrumento de control entre el patrón de masa y la masa de transferencia. Si para la determinación de la masa de transferencia se utilizaran los patrones de masa de referencia necesarios para que la indicación en el instrumento de control fuese la misma para los patrones de masa de referencia y la masa de transferencia, ΔI_C sería nula y m'_{ref} sería igual a m_{ref} . En general, eso no será práctico y m'_{ref} masa de los patrones de referencia será próxima pero no igual a la masa de transferencia m_{ref} .

Sin embargo, por comodidad en el desarrollo y teniendo en cuenta que, según los términos del Anexo VII, conviene tratar conjuntamente los términos de empuje del aire sobre las masas de transferencia y los patrones de referencia, los términos de incertidumbre asociados a efectos físicos sobre las masas se agrupan en m'_{ref} y los términos de incertidumbre asociados al instrumento de control se agrupan en ΔI_C .

con las varianzas

$$u^2(E) = u^2(I) + u^2(m'_{ref}) + u^2(\Delta I_C) \quad (7.1-2)$$

Estos términos serán expandidos a continuación.

7.1.1. Incertidumbre típica de la indicación en la seleccionadora ponderal

Para tomar en consideración las fuentes de variabilidad de la indicación, se tendrán en cuenta los términos de corrección δI_{xx} de la manera siguiente:

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

En los casos en los que el instrumento no permita tomar la indicación a carga nula, se tomará I_0 como valor nulo. Todas estas correcciones tienen esperanza matemática nula. Sus incertidumbres típicas son:

- 7.1.1.1.** δI_{dig0} da cuenta del error de redondeo de la indicación a carga nula. Sus límites son $\pm d_0/2$ y se les suponen distribuciones rectangulares, por lo que

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

En un instrumento que tiene aprobación de modelo según OIML R51 [12] el error de redondeo de una indicación de cero después de una operación de puesta a cero o de equilibrio de tara está limitado por $d_0/2$, por lo que

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

- 7.1.1.2.** δI_{digL} da cuenta del error de redondeo de la indicación con carga. Sus límites son $\pm d_l/2$ y se les suponen distribuciones rectangulares, por lo que

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

Nota: en un instrumento de escalones múltiples, d_l varía con l !

7.1.1.3. δI_{rep} da cuenta del error debido a la imperfección de la repetibilidad; se le supone una distribución normal y se estima por

$$u(\delta I_{rep}) = s(I_j)/\sqrt{n}. \tag{7.1.1-4}$$

con $s(I_j)$ según 6.1 y la indicación I_j como media de n lecturas.

7.1.1.4. δI_{ecc} da cuenta del error debido al paso de una carga de prueba por el receptor en una posición descentrada. Este efecto puede producirse cuando el instrumento no dispone de unas guías para centrar la carga de prueba o cuando las guías no son adecuadas a ese artículo. Cuando no se puede desprestigiar el efecto, una estimación de su valor puede basarse en estas suposiciones:

Las diferencias determinadas por (6.3-1) son proporcionales al valor de la carga.

En las aplicaciones de calibración reales, se considera que el efecto no es mayor que $\frac{1}{2}$ del valor de la prueba de excentricidad.

Basándose en la mayor de las diferencias determinadas según 6.3, se estima que el efecto es

$$\delta I_{ecc} \leq \{|\Delta I_{ecc, i}|_{max}/(2L_{ecc})\}I \tag{7.1.1-5}$$

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

$$u(\delta I_{ecc}) = I |\Delta I_{ecc, i}|_{max}/(2L_{ecc}\sqrt{3}) \tag{7.1.1-6a}$$

o, en notación relativa

$$\hat{w}(I_{ecc}) = |\Delta I_{ecc, i}|_{max}/(2L_{ecc}\sqrt{3}) \tag{7.1.1-6b}$$

7.1.1.5. La incertidumbre típica de la indicación se obtienen normalmente mediante

$$u^2(I) = d_0^2/12 + d_1^2/12 + s^2(I)/n + \hat{w}^2(I_{ecc}) I^2 \tag{7.1.1-7}$$

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

Nota 2: los primeros dos términos del miembro derecho pueden haber de ser modificados en casos especiales según lo indicado en 7.1.1.1 y 7.1.1.2.

7.1.2. Incertidumbre típica del patrón de masa

A partir de (4.4.2-2), excluyendo los términos relativos a indicaciones en el instrumento de control, el valor de referencia de la masa es:

$$m'_{ref} = m_N + \delta m_c + \delta m_D + \delta m_{conv2} + \delta m_{conv1} + \delta m_{BTot} + \delta m... \tag{7.1.2-1}$$

El último término representa correcciones posteriores que pueda ser necesario aplicar en condiciones especiales; las componentes y su tratamiento se indican en el Anexo VII.

En este caso, $m'_{ref} = m_N + \delta m_c$, calculada según OIML R111.

Las correcciones y sus incertidumbres típicas son:

- 7.1.2.1.** δm_c es la corrección a m_N para obtener la masa convencional real m_c , dada en el certificado de calibración de los patrones, junto con la incertidumbre de calibración U y el factor de cobertura k . La incertidumbre típica es

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

Cuando el patrón se ha calibrado respecto de unas tolerancias especificadas Tol , por ejemplo los mpe dados en R 111, y se usa con su valor nominal m_N , $\delta m_c = 0$, y se supone una distribución rectangular, entonces

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

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

Nota 1: ver 4.4.1 sobre el uso de m_c o m_N

Nota 2: Cuando se establece la conformidad de los patrones a R 111, puede modificarse (7.1.2-3), reemplazando Tol por mpe . Para patrones con $m_N \geq 0,1$ kg el cociente mpe/m_N es constante para todos los patrones que pertenecen a una misma clase de exactitud, $mpe = c_{class}m_N$ con c_{class} a partir de la Tabla 7.1.2.

(7.1.2-3) puede usarse entonces en la forma

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

o como incertidumbre típica relativa

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

Tabla 7.1.2 Cociente $c_{class} = mpe/m_N$ para patrones $m_N \geq 100$ g según R 111
[4]

| Clase | $c_{class} \times 10^6$ |
|----------------|-------------------------|
| F ₁ | 5 |
| F ₂ | 16 |
| M ₁ | 50 |
| M ₂ | 160 |
| M ₃ | 500 |

Para patrones de valor nominal 2×10^n de las clases F₂ y M₂, el valor de $c_{class} \times 10^6$ debe ser substituido por 15 y 150, respectivamente.

7.1.2.2. δm_{BTot} es la corrección por el empuje del aire introducida en 4.3.2. Su valor depende de la densidad ρ_{Cal} del patrón de ajuste y del alcance de variación supuesto para la densidad del aire ρ_a , y del ajuste del instrumento (ver G-ENAC-13). Aquí se considera el caso en que los ajustes de los instrumentos se han realizado en el momento de la calibración. El caso correspondiente a la calibración en el Laboratorio permanente se considera en el Anexo VII.

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N (\rho_a - \rho_0)(1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_c) \quad (7.1.2-4)$$

$$\delta m_{\text{BTot}} = 0 \quad (7.1.2-5)$$

con incertidumbre típica relativa

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_a)(1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_c)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}})/(\rho_{\text{Cal}})^4 \quad (7.1.2-6a)$$

En la medida en que se conozcan los valores de ρ_{Cal} , $u(\rho_{\text{Cal}})$, ρ_a y $u(\rho_a)$, deben utilizarse en la determinación de $\hat{w}(m_B)$.

La densidad ρ_{Cal} y su incertidumbre típica pueden estimarse, si no se dispone de dicha información, según valores consensuados. El Anexo V apartado 1 da valores reconocidos internacionalmente para los materiales utilizados usualmente en los patrones de masa.

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

El Anexo I ofrece varias formulas, así como información sobre las varianzas esperadas.

El Anexo V ofrece valores de $\hat{w}(m_B)$ para algunas combinaciones escogidas de valores de ρ_{Cal} y ρ_a . Los valores son, en general, despreciables.

Cuando se ha establecido la conformidad de los patrones con R 111[4], y no se dispone de información sobre ρ_{Cal} y ρ_a , puede recurrirse a la sección 10 de R 111¹. No se aplica ninguna corrección, y las incertidumbres relativas son

$$\hat{w}(m_{\text{BTot}}) \approx mpe/(4m_A\sqrt{3}) \quad (7.1.2-6b)$$

A partir de los requisitos de la nota a pie de página 5, pueden derivarse los siguientes límites para ρ :

para la clase E₂: $|\rho_{\text{Cal}} - \rho_c| \leq 200 \text{ kg/m}^3$, y para la clase F₂: $|\rho_{\text{Cal}} - \rho_c| \leq 600 \text{ kg/m}^3$.

¹ La densidad del material utilizado para las pesas debe ser tal que una desviación del 10 % respecto de la densidad del aire especificada (1,2 kg/m³) no produzca un error superior a un cuarto del error máximo permitido.

Nota: Debido al hecho que la densidad de los materiales usados para los patrones de masa está normalmente más cercana a ρ_c que lo indicado por los límites de R111, las últimas dos ecuaciones pueden considerarse como límites superiores para $\hat{w}(m_{B\text{Tot}})$. Cuando la simple comparación de estos valores con la resolución del instrumento ($1/n_M = d/Max$) muestra que son suficientemente pequeños, puede ser innecesario un cálculo más elaborado de esta componente de la incertidumbre, basada en datos reales.

7.1.2.3. δm_D es una corrección por la posible deriva de m_c desde la última calibración. Se supone un valor límite D , de la mejor manera, basado en la diferencia en m_c puesta de manifiesto en los certificados de calibración consecutivos de los patrones.

En ausencia de dicha información, D puede estimarse considerando la calidad de los patrones y la frecuencia y cuidado en su uso, en un múltiplo de su incertidumbre expandida $U(m_c)$:

$$D = k_D U(m_c) \quad (7.1.2-7)$$

donde k_D puede escogerse entre 1 y 3.

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

$$u(\delta m_D) = D/\sqrt{3} \quad (7.1.2-8a)$$

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

$$\hat{w}(m_D) = D_{\text{rel}}/\sqrt{3} = k_D W(m_N)/\sqrt{3} \quad (7.1.2-8b)$$

Para las pesas conformes a R111 [4], la estimación puede ser $D \leq mpe$, o $D_{\text{rel}} \leq c_{\text{class}}$ – ver la Tabla 7.1.1

7.1.2.4. δm_{conv} es una corrección para los efectos de convección según 4.2.3, tanto en la seleccionadora ponderal como en el instrumento de control. Si las cargas de son artículos ya preparados y se encuentran en las instalaciones del cliente en una zona cercana al instrumento a calibrar y al instrumento de control todos se encontrarán a una temperatura suficientemente parecida como para que no sea necesario un tiempo de aclimatación y los efectos de la convección sean despreciables. Los otros casos se tratan en el anexo VI.

7.1.2.5. La incertidumbre típica de la masa de referencia se obtiene a partir de (ver 7.1.2)

$$u^2(m'_{\text{ref}}) = u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_{B\text{Tot}}) + u^2(\delta m_D) + u^2(\delta m_{\text{conv}}) \quad (7.1.2-9a)$$

con las contribuciones indicadas de 7.1.2.1 a 7.1.2.4.

Como ejemplo se especifican los términos con patrones de $m_N \geq 0,1$ kg conformes a R111, usados con sus valores nominales:

$$\hat{w}^2(m'_{ref}) = c^2_{class}/3 + c^2_{class}/48 + c^2_{class}/3 + (\Delta m_{conv}/m_N)^2/3 \quad (7.1.2-9b)$$

7.1.3. Incertidumbre de la desviación en el instrumento de control.

A partir de las ecuaciones relevantes de G-ENAC-13, para el proceso de uso de los patrones de masa y establecimiento de la masa de transferencia se obtiene

$$\Delta I_C = (I_{L1} - I_{01} - R_L + R_0) - \delta R_{digL} + \delta R_{dig0} + \delta I_{digL1} - \delta I_{dig0} + \delta I_{rep1} + \delta I_{ecc1} + \delta R_{rep} + \delta R_{ecc1} + \delta R_{instr} + \delta R_{proc} \quad (7.1.3-1)$$

y

$$u^2(\Delta I_C) = u^2(I_{L1} - I_{01} - R_L + R_0) - u^2(\delta R_{digL}) + u^2(\delta R_{dig0}) + u^2(\delta I_{digL1}) + u^2(\delta I_{dig0}) + u^2(\delta I_{rep1}) + u^2(\delta I_{ecc1}) + u^2(\delta R_{rep}) + u^2(\delta R_{ecc}) + u^2(\delta R_{instr}) + u^2(\delta R_{proc}) \quad (7.1.3-2)$$

donde excepto el primero, los términos se calculan según lo indicado en G-ENAC-13. Las condiciones en las que se realiza la transferencia son tales que $u^2(\delta R_{instr}) \approx u^2(\delta R_{proc}) \approx 0$.

Los términos $u^2(\delta I_{rep1}) + u^2(\delta I_{ecc1}) + u^2(\delta R_{rep}) + u^2(\delta R_{ecc})$ aparecen así, si la calibración de las masas de transferencia se ha realizado separadamente en un instrumento de control que ha sido calibrado con patrones de masas de referencia en otro momento. El término $u^2(\delta R_{ecc})$, con las precauciones habituales del laboratorio, será igual a $u^2(\delta I_{ecc1})$. En este caso, además, $u^2(I_{L1} - I_{01} - R_L + R_0)$ es $u^2(E_{RC})$, la incertidumbre del error del instrumento de control a la carga R , determinada según G-ENAC-13 y, para el valor esperado, se tiene $\Delta I_C = (I_{L1} - I_{01} - R_L + R_0) = E_{RC}$. Si se ha procurado que las masas de transferencia y los valores calibrados del instrumento de control estén suficientemente próximos, la incertidumbre del error será la indicada en el certificado de calibración para ese punto. Si no se produce esa proximidad, será necesario aplicar técnicas similares a las indicadas en el Anexo III de G-ENAC-13. Por otra parte, al haberse realizado las calibraciones en momentos diferentes puede ser necesario considerar componentes adicionales de incertidumbre asociadas al instrumento de control, como se describe en el Anexo VII.

Si la calibración de la masa de transferencia se realiza por comparación con los patrones de referencia en el mismo momento los términos $u^2(\delta I_{rep1}) + u^2(\delta I_{ecc1}) + u^2(\delta R_{rep}) + u^2(\delta R_{ecc})$ no tienen existencia experimental separada, sino que aparecen conjuntamente como una repetibilidad del proceso, $u^2(\delta I_{rep})$. En la mayor parte de casos solamente se realiza un ciclo de comparación, por lo que la repetibilidad debe conocerse previamente; si no, para alguna de las cargas deberán realizarse más ciclos de comparación para conocer su repetibilidad. En este caso, además, $u^2(I_{L1} - I_{01} - R_L + R_0)$ es la incertidumbre asociada a la falta de linealidad del instrumento de control en las proximidades de R_L , $u^2(\Delta I)$, que, en general, será despreciable, si el nominal de las pesas patrón se aproxima suficientemente al valor de las masas de transferencia.

7.1.4. Incertidumbre típica del error

La incertidumbre típica del error se calcula, con los términos adecuados de 7.1.1, 7.1.2 y 7.1.3 mediante

$$u^2(E) = d_0^2/12 + d_1^2/12 + s^2(I)/n + u^2(\delta I_{ecc}) + u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_b) + u^2(\delta m_D) + u^2(\delta m_{conv}) + u^2(\Delta I_C) \quad (7.1.4-1a)$$

o, cuando se utilizan incertidumbres relativas, mediante

$$u^2(E) = d_0^2/12 + d_i^2/12 + s^2(l)/n + \hat{w}^2(I_{ecc})I^2 + \{\hat{w}^2(m_c) + \hat{w}^2(m_B) + \hat{w}^2(m_D)\}m_{ref}^2 + u^2(\delta m_{conv}) + u^2(\Delta I_{IC}) \quad (7.1.4-1b)$$

Se considera que no hay correlaciones entre las magnitudes de entrada, por lo que no se toman en consideración las covarianzas.

Se ha omitido el índice "j". Cuando los últimos términos de (7.1.4-1a, b) son pequeños comparados con los tres primeros términos, es fácil que las incertidumbres de todos los errores determinados en el campo de pesaje sea bastante similar. Si no se da este caso, la incertidumbre debe calcularse de manera individual para cada indicación.

Considerando que la experiencia general es que los errores son normalmente muy pequeños comparados con la indicación, o incluso iguales a cero, los valores de l y m_{ref} en (7.1.4-1a, b) pueden reemplazarse por I_N .

Los términos de (7.1.4-1a, b) pueden agruparse entonces en una ecuación simple que refleja mejor el hecho de que algunos de los términos son absolutos por naturaleza, mientras que otros son proporcionales a la indicación:

$$u^2(E) = \alpha^2 + \beta^2 I^2 \quad (7.1.4-2)$$

7.2. Incertidumbre expandida en la calibración

La incertidumbre expandida del error es

$$U(E) = k u(E) \quad (7.2-1)$$

El factor de cobertura k debería escogerse de manera que la incertidumbre expandida corresponda a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95 %.

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

- a) puede atribuirse una distribución normal (Gausiana) al error de indicación,
- y**
- b) la incertidumbre típica $u(E)$ merece suficiente confianza (es decir, tiene un número suficiente de grados de libertad).

El Anexo II apartado 2 ofrece información adicional sobre estas condiciones, y el Anexo II apartado 3 aconseja sobre como determinar el factor k cuando no se cumple una, o ambas.

Es aceptable determinar solamente un valor de k , para la situación de "peor caso" determinada por la experiencia, que puede aplicarse a las incertidumbres típicas de todos los errores del mismo campo de pesaje.

7.3. Incertidumbre del resultado de las pesadas en condiciones de uso

Si llamamos W al resultado de las pesadas tenemos la expresión general

$$W = R - E(R) \pm U(W) \quad (7.3-1)$$

Para estimar la incertidumbre del resultado de las pesadas en el uso hemos de definir, al menos someramente, las condiciones de uso.

Podemos describir la condición de uso del instrumento en modo dinámico como aquella en que el objeto es pesado una sola vez y no pueden realizarse correcciones a las lecturas del instrumento. Generalmente la máquina toma decisiones del tipo *Pasa – No Pasa* o imprime una etiqueta con el peso del artículo pesado en el mismo momento de la medida. Las únicas correcciones posibles son aquellas previamente programadas en el instrumento y que también actuarán durante la calibración del mismo.

Cuando se trata de pesar objetos iguales al artículo calibrado, una expresión alternativa a (7.3-1) podría ser

$$W = R - E(R) \pm U(E) \quad (7.3-2)$$

Y en consecuencia, si se pudiera corregir el error

$$u^2(W) = u^2(R) + u^2(E) \quad (7.3-3)$$

Donde:

- $u(R)$ representa la incertidumbre de la lectura en las condiciones de uso, esto es, la incertidumbre de una lectura individual.
- $u(E)$ es la incertidumbre con que se determina el error del instrumento en cada punto calibrado.

Como no es posible corregir el error, más adelante se dan dos opciones para su tratamiento matemático.

7.3.1. Incertidumbre de la lectura en condiciones de uso

La incertidumbre de la lectura en las condiciones de uso la obtendríamos desde la expresión:

$$R = R_L - R_0 + \delta R_{digL} - \delta R_{dig0} + \delta R_{rep} + \delta R_{ecc} + \delta R_{instr} + \delta R_{proc} \dots \quad (7.3.1-1)$$

Según la cual el valor de la incertidumbre de la indicación se ve afectado por el error de redondeo de la indicación con carga, $\delta R(d_L)$, el error de redondeo de la indicación sin carga, $\delta R(d_0)$, el error debido a la falta de repetibilidad $\delta R(s)$ y el error debido al efecto de la excentricidad $\delta R(ecc)$, y otros que pudiera ser necesario considerar en algún caso. Estos errores se consideran iguales a cero, pero no así sus incertidumbres.

Las contribuciones de incertidumbre serían:

$$u(\delta R_{digL}) = d_L / (2 \sqrt{3}) \quad (7.3.1-2)$$

$$u(\delta R_{dig0}) = d_0 / (2 \sqrt{3}) \quad (7.3.1-3)$$

$$u(\delta R_{rep}) = s \quad (7.3.1-4)$$

$$u(\delta R_{ecc}) = R \cdot |\Delta_{ecc}| / (2L_{ecc}\sqrt{3}) \quad (7.3.1-5)$$

La desviación típica s se obtiene a partir de la prueba de repetibilidad, según la expresión

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

Nótese que la contribución debida a la falta de repetibilidad se ve dividida por el número de reiteraciones, pero al pesarse cada objeto una única vez sobre el instrumento tenemos una única reiteración. Esta es una diferencia importante entre la incertidumbre de la lectura en condiciones de uso respecto de la incertidumbre de las indicaciones en condiciones de calibración.

El término debido a la falta de excentricidad no se tendrá en cuenta cuando la carga no pueda aplicarse de forma excéntrica sobre el receptor de carga por la naturaleza y forma del artículo o por el diseño del receptor de carga, por ejemplo por la existencia de guías que se adaptan al ancho del artículo.

Cuanto este término se toma en consideración, se ha tomado $\frac{1}{2}$ del valor determinado en la prueba de excentricidad porque el centrado en las condiciones de uso es mejor que en dicha prueba.

Los términos δR_{instr} y δR_{proc} darán cuenta de las posibles diferencias entre los errores calculados durante la calibración y los errores en condiciones de uso, debidas a diferencias entre las condiciones de uso respecto a las condiciones de calibración, como por ejemplo distinto peso de los artículos en relación con la masa de transferencia o distinta velocidad de proceso en relación con la velocidad durante la calibración. Cuando las condiciones de funcionamiento son bastante próximas a las condiciones durante la calibración estas contribuciones pueden despreciarse.

En consecuencia, la varianza de la indicación de una lectura en condiciones de uso queda de la siguiente manera:

$$u^2(R) = d_i^2/12 + d_o^2/12 + s^2(R) + R^2 |\Delta I_{ecc}|_{max}^2 / (12L_{ecc}^2) + \dots \quad (7.3.1-6)$$

7.3.2. Incertidumbre típica del error

La incertidumbre típica del error se obtiene a partir de las expresiones incluidas en el apartado 7.1.4.

7.3.3. Incertidumbre expandida de un resultado de pesada

Como se ha dicho anteriormente, la incertidumbre de las medidas en condiciones de uso debe incorporar los errores de medida del instrumento. En línea con lo indicado en el apartado 7.5.2 de G-ENAC-13 se establecen dos ecuaciones para la incertidumbre "global" (que incorpora el error), U_{gl} , en cada uno de los puntos de calibración:

$$U_{gl}(W_i) = 2\sqrt{u^2(R_i) + u^2(E_i) + \frac{|E(R)|_{Max}^2}{3}} \quad (7.3.3-1)$$

$$U_{gl}(W_i) = 2\sqrt{u^2(R_i) + u^2(E_i) + |E_i|} \quad (7.3.3-2)$$

8. CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Esta sección contiene directrices sobre la información que podría ser útil dar en un certificado de calibración. Pretende ser coherente con los requisitos de ISO/IEC 17025, que tienen prioridad. Si el certificado contiene resultados de la calibración en modo no automático es aplicable también el apartado 8 de G-ENAC-13.

8.1. Información general

- Identificación del Laboratorio de Calibración.
- Referencia a la acreditación (organismo de acreditación, número de acreditación).
- Identificación del certificado (número de calibración, fecha de emisión, número de páginas).
- Firma(s) de la(s) persona(s) autorizada(s).
- Identificación del cliente.
- Identificación del instrumento calibrado.
- Información sobre el instrumento (Fabricante, modelo de instrumento, Max, d, lugar de instalación).

8.2. Información sobre el procedimiento de calibración

- Fecha de las mediciones.
- Lugar de calibración.
- Condiciones ambientales.
- Dimensiones del artículo.
- Longitud de plataforma.
- Velocidad de avance de la cinta.
- Configuración de velocidad.
- Cadencia máxima.
- Valor pesado del artículo.
- Otras condiciones de uso que puedan afectar a los resultados de calibración.
- Información sobre el instrumento (factor de ajuste dinámico, anomalías de funcionamiento, parámetros de configuración del software en la medida que es relevante para la calibración, etc.).
- Información sobre la trazabilidad de los resultados de medida.
- Si el instrumento sólo se ha calibrado en estático se indicará expresamente que los resultados no son válidos para el funcionamiento dinámico del mismo.

8.3. Resultados de medida

- Indicaciones o errores (o ambos) para las cargas de prueba aplicadas, o errores relacionados con las indicaciones,
- Detalles del procedimiento de carga si es relevante para la comprensión de lo precedente.
- Desviaciones típicas determinadas, identificadas como relacionadas con una única indicación o con la media de las indicaciones.
- Incertidumbre expandida de medida de los resultados declarados.
- Indicación del factor de cobertura k , con el comentario sobre la probabilidad de cobertura, y la razón para $k \neq 2$ cuando proceda.
- Cuando las indicaciones/errores no se han determinado mediante lecturas normales (lecturas únicas con la resolución normal del instrumento), debería incluirse una advertencia de que la incertidumbre declarada es menor que la que se encontraría con lecturas normales.

Para los clientes menos informados, podría ser útil dar información cuando proceda, sobre:

- La definición del error de indicación,
- cómo corregir las lecturas en uso por substracción de los errores correspondientes,
- cómo interpretar indicaciones o errores presentados con decimales menores que el escalón d .
- Puede ser útil dar los valores de $U_{gl}(W_i)$ para las cargas de transferencia aplicadas.

8.4. Información adicional:

Puede darse información adicional sobre la incertidumbre de medida esperable en uso incluyendo las condiciones bajo las que es aplicable (una sola pesada, sin corrección del error encontrado en calibración, cargas similares a las de prueba).

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

$$W = R \pm U_{gl}(W) \quad (8.4-1)$$

Opcional:

declaración de conformidad con una especificación dada, y campo de validez cuando aplique.

Esta declaración puede tener la forma

$$W = R \pm ToI \quad (8.4-2)$$

y puede darse

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

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

9. REFERENCIAS

- [1] *Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*, first edition 1993, ISO (Geneva, Switzerland)
- [2] *OIML R 76: Non-automatic Weighing Instruments Part 1: Metrological Requirements - Tests*, edition 2006
- [3] *EN 45501: Metrological Aspects of Non-automatic Weighing Instruments*, edition 1992 with supplement 1994
- [4] *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* , edition 2004
- [5] *A. Picard, R. S. Davis, M. Gläser, K. Fujii: Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)*. Metrologia 45 (2008), p. 149-155
- [6] *M. Glaeser: Change of the apparent mass of weights arising from temperature differences* Metrologia 36 (1999), p. 183-197
- [7] *ISO 31 Quantities and Units (1993)*
Part 11: Mathematical Signs and Symbols for use in physical sciences and technology
- [8] *VIM, International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology, 2nd edition 1994*
- [9] *Determination of Mass – Part 1: Dissemination of the unit of mass*, by R. Balhorn, D. Buer, M. Gläser and M. Kochsiek
PTB-Bericht MA-24, 2nd revised edition, Braunschweig, April 1992
- [10] *G-ENAC-13: Calibración de instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático*, Rev. 2 Noviembre 2010.
- [11] *G-ENAC-17: Calibración de instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático: Ajustes durante el proceso de calibración*. Rev. 1 Noviembre 2010
- [12] *OIML R 51-1: Automatic catchweighing instruments. Part 1: Metrological and technical requirements – Test*. Edition 2006

“El presente documento se distribuye como copia no controlada. Puede consultar su revisión en la página web de ENAC, en el apartado “documentos” o internamente en red”.

RECOMENDACIONES SOBRE LA ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE

| | | |
|------|--|---|
| 1. | FORMULAS PARA LA DENSIDAD DEL AIRE | 1 |
| 1.1. | Versión simplificada de la fórmula del BIPM, versión exponencial..... | 1 |
| 1.2. | Versión simplificada de la fórmula del BIPM, versión normal..... | 2 |
| 1.3. | Fórmula de Boyle-Mariotte | 2 |
| 1.4. | Errores de las fórmulas..... | 3 |
| 1.5. | Densidad media del aire | 3 |
| 2. | VARIACIONES DE LOS PARÁMETROS QUE CONTRIBUYEN A LA DENSIDAD DEL AIRE | 4 |
| 2.1. | Presión barométrica:..... | 4 |
| 2.2. | Temperatura..... | 4 |
| 2.3. | Humedad relativa | 5 |
| 3. | INCERTIDUMBRE DE LA DENSIDAD DEL AIRE | 5 |

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

1. FORMULAS PARA LA DENSIDAD DEL AIRE

La fórmula más exacta para determinar la densidad del aire húmedo es la recomendada por el CIPM [5]². Para los objetivos de esta Guía, son suficientes fórmulas menos complejas que proporcionan resultados ligeramente menos precisos.

1.1. Versión simplificada de la fórmula del CIPM, versión exponencial

de [4], sección E3

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

donde

| | |
|----------|--|
| ρ_a | densidad del aire en kg/m ³ |
| p | presión barométrica en hPa |
| h_r | humedad relativa del aire en % |
| t | temperatura del aire en °C |

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

$$600 \text{ hPa} \leq p \leq 1100 \text{ hPa}$$

$$20 \% \leq h_r \leq 80 \%$$

$$15 \text{ °C} \leq t \leq 27 \text{ °C}$$

² Los rangos de temperatura y presión en los que puede ser utilizada la ecuación CIPM-2007 son
600 hPa ≤ p ≤ 1100 hPa
15 °C ≤ t ≤ 27 °C

1.2. Versión simplificada de la fórmula del CIPM, versión normal

[9] da esta expresión

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

con los mismos símbolos que en el caso precedente.

La fórmula da resultados con $\Delta\rho_{a,form} \leq 0,00141 \text{ kg/m}^3$ en las siguientes condiciones ambientales (las incertidumbres de medida de p , h_r , t no están incluidas):

| | |
|-------|---|
| p | $600 \text{ hPa} \leq p \leq 1100 \text{ hPa}$ |
| h_r | $20 \% \leq h_r \leq 80 \%$ |
| t | $15 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 27 \text{ }^\circ\text{C}$ |

$\Delta\rho_{a,form}$ es la diferencia entre los valores dados por esta fórmula y los valores correspondientes de la fórmula del CIPM. Por ello, la incertidumbre típica combinada relativa de la fórmula $\hat{W}(\rho_{a,form})$ viene dada por

$$\hat{W}^2(\rho_{a,form}) = (2,2 \times 10^{-5})^2 + ((0,00141 \text{ kg/m}^3)/(1,2 \text{ kg/m}^3))^2/3 = 4,61 \times 10^{-7} \quad (\text{A1.2-2})$$

$$\hat{W}(\rho_{a,form}) = 6,79 \times 10^{-4} \quad (\text{A1.2-3})$$

1.3. Fórmula de Boyle-Mariotte

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

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

Los valores de referencia pueden escogerse según la conveniencia. Podrían ser los valores reales determinados en el momento de la calibración, o cualquier otro conjunto conveniente de valores.

Una modificación muy conveniente de esta fórmula puede darse en la forma siguiente:

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

que proporciona valores dentro de $\pm 1,1 \%$ de los valores del CIPM (ver 1.4 para su justificación y campo de validez).

1.4. Errores de las fórmulas

Se han realizado cálculos muestrales con hojas de cálculo EXCEL para comparar los resultados de densidad del aire obtenidos mediante las ecuaciones precedentes con los valores del CIPM para $x_{CO_2} = 0,0004$.

Las comparaciones se han realizado para los siguientes campos/pasos de los parámetros:

- Temperatura $t = 15\text{ °C}$ a 27 °C
- Presión barométrica $p = 600\text{ hPa}$ a 1100 hPa
- Humedad relativa $h_r = 20\%$ a 80%

La máxima diferencia entre un valor dado por una fórmula más simple y el correspondiente valor CIPM, expresado en % del valor del CIPM, fue

| Fórmula ↓ | Diferencia máxima (absoluta) |
|--|------------------------------|
| (A.1.1-1) | + 0,024 % |
| (A.1.2-1) | + 0,20 % |
| (A.1.3-1) Referencia $\rho_a = 1,20021\text{ kg/m}^3$ | + 1,4 % |
| (A.1.3-2), Referencia $\rho_a = 1,20139\text{ kg/m}^3$ | + 0,9 % |

Nota:

Para $\rho_a = 1,20021\text{ kg/m}^3$, los valores de referencia fueron $t = 20\text{ °C}$, $p = 1014\text{ hPa}$, $h_r = 50\%$.

En la última línea, los valores de referencia fueron $t = 20\text{ °C}$, $p = 1015\text{ hPa}$, $h_r = 50\%$ mientras que la densidad del aire de referencia se ha puesto arbitrariamente en

$$\rho_{a,ref} = (1,20139\text{ kg/m}^3 \times 0,99462)$$

para obtener un mejor ajuste respecto de CIPM-2007.

1.5. Densidad media del aire

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

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

con $p_0 = 101325\text{ Pa}$
 $\rho_0 = 1,200\text{ kg/m}^3$
 $g = 9,81\text{ m/s}^2$ $h =$ altitud sobre el nivel del mar en m

2. VARIACIONES DE LOS PARÁMETROS QUE CONTRIBUYEN A LA DENSIDAD DEL AIRE

2.1. Presión barométrica:

La presión barométrica media p_{ov} puede estimarse a partir de la altitud h en m sobre el nivel del mar SL del lugar, usando la relación

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

con $p(SL) = 1013,12 \text{ hPa}$

En cualquier lugar, la variación es, como máximo, $\Delta p = \pm 40 \text{ hPa}$ sobre la media.³ Dentro de esos límites, la distribución no es rectangular ya que los valores extremos ocurren solamente una vez en un período de varios años. Es más realista suponer una distribución normal, con Δp correspondiendo al valor "2 σ " o incluso "3 σ ". Por ello

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

2.2. Temperatura

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

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

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

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

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

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

³ Ejemplo: en Hannover, Alemania, la diferencia entre la máxima y mínima presión barométrica registrada a lo largo de 20 años fue de 77,1 hPa (Información de DWD, Servicio Meteorológico Alemán)

2.3. Humedad relativa

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

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

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

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

De tenerse presente que

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

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

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

3. INCERTIDUMBRE DE LA DENSIDAD DEL AIRE

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

$$u(\rho_a)/\rho_a = \sqrt{\left(u_p(\rho_a)/\rho_a \cdot u(p)\right)^2 + \left(u_t(\rho_a)/\rho_a \cdot u(t)\right)^2 + \left(u_{hr}(\rho_a)/\rho_a \cdot u(h_r) + \left(u_{\text{form}}(\rho_a)/\rho_a\right)^2\right)^2} \quad (\text{A3.1-1})$$

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

$u_p(\rho_a)/\rho_a = 1 \times 10^{-3}$ para la presión barométrica
 $u_t(\rho_a)/\rho_a = -4 \times 10^{-3}$ para la temperatura del aire
 $u_{hr}(\rho_a)/\rho_a = -9 \times 10^{-3}$ para la humedad relativa

Ejemplos de incertidumbre típica de la densidad del aire, calculados para diferentes parámetros

| $\Delta p/hPa$ | $\Delta t/^\circ C$ | Δh_r | $u_p(\rho_a)/\rho_a$ $u(\rho)$ | $u_t(\rho_a)/\rho_a$ $u(t)$ | $u_{hr}(\rho_a)/\rho_a$ $u(h_r)$ | $u_{form}(\rho_a)/\rho_a$ | $u(\rho_a)/\rho_a$ |
|----------------|---------------------|--------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 40 | 2 | 0,2 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-2,31 \times 10^{-3}$ | $-5,20 \times 10^{-4}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $1,18 \times 10^{-2}$ |
| 40 | 2 | 1 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-2,31 \times 10^{-3}$ | $-2,60 \times 10^{-3}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $1,21 \times 10^{-2}$ |
| 40 | 5 | 0,2 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-5,77 \times 10^{-3}$ | $-5,20 \times 10^{-4}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $1,29 \times 10^{-2}$ |
| 40 | 5 | 1 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-5,77 \times 10^{-3}$ | $-2,60 \times 10^{-3}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $1,32 \times 10^{-2}$ |
| 40 | 10 | 0,2 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-1,15 \times 10^{-3}$ | $-5,20 \times 10^{-4}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $1,63 \times 10^{-2}$ |
| 40 | 10 | 1 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-1,15 \times 10^{-3}$ | $-2,60 \times 10^{-3}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $1,65 \times 10^{-2}$ |
| 40 | 20 | 0,2 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-2,31 \times 10^{-3}$ | $-5,20 \times 10^{-4}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $2,58 \times 10^{-2}$ |
| 40 | 20 | 1 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-2,31 \times 10^{-3}$ | $-2,60 \times 10^{-3}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $2,60 \times 10^{-2}$ |
| 40 | 30 | 0,2 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-3,46 \times 10^{-3}$ | $-5,20 \times 10^{-4}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $3,65 \times 10^{-2}$ |
| 40 | 30 | 1 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-3,46 \times 10^{-3}$ | $-2,60 \times 10^{-3}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $3,66 \times 10^{-2}$ |
| 40 | 40 | 0,2 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-4,62 \times 10^{-3}$ | $-5,20 \times 10^{-4}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $4,76 \times 10^{-2}$ |
| 40 | 40 | 1 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-4,62 \times 10^{-3}$ | $-2,60 \times 10^{-3}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $4,77 \times 10^{-2}$ |
| 40 | 50 | 0,2 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-5,77 \times 10^{-3}$ | $-5,20 \times 10^{-4}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $5,89 \times 10^{-2}$ |
| 40 | 50 | 1 | $1,15 \times 10^{-2}$ | $-5,77 \times 10^{-3}$ | $-2,60 \times 10^{-3}$ | $2,20 \times 10^{-5}$ | $5,89 \times 10^{-2}$ |

La incertidumbre típica relativa debida a la fórmula del CIPM es $2,20 \times 10^{-5}$ [5].

Para las aproximaciones A.1.1-1, A.1.2-1 y A.1.3-1, se debe substituir apropiadamente la incertidumbre típica relativa debida a la fórmula aproximada correspondiente, $u_{form}(\rho_a)/\rho_a$.

FACTOR DE COBERTURA k PARA LA INCERTIDUMBRE EXPANDIDA DE MEDIDA

| | |
|--|---|
| 1. OBJETIVO | 1 |
| 2. CONDICIONES BÁSICAS PARA LA APLICACIÓN DE $k = 2$ | 1 |
| 3. LA DETERMINACIÓN DE k EN OTROS CASOS | 1 |
| 3.1. Distribución supuestamente normal | 2 |
| 3.2. Distribución no normal..... | 2 |

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

1. OBJETIVO

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

2. CONDICIONES BÁSICAS PARA LA APLICACIÓN DE $K = 2$

El factor $k = 2$ se aplica cuando se dan las siguientes condiciones:

se puede asignar una **distribución normal** a la estimación de salida y , y $u(y)$ es **suficientemente fiable**, ver [1]

La **distribución normal** puede **suponerse** cuando varias ($N \geq 3$) contribuciones de incertidumbre, cada una de ellas derivada de distribuciones "bien comportadas" (normal, rectangular o similar), contribuyen a $u(y)$ en cantidades comparables (ver [1]).

Nota: Esto implica que ninguna de las contribuciones que tienen distribuciones que no son la normal tiene un valor dominante, según se define en B.3.2.

La **fiablez suficiente** depende de los grados efectivos de libertad. Este criterio se satisface cuando ninguna contribución de Tipo A a $u(y)$ se basa en menos de 10 observaciones. ver [1].

3. LA DETERMINACIÓN DE k EN OTROS CASOS

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

3.1. Distribución supuestamente normal

Cuando la distribución del estimador de salida y puede suponerse normal, pero $u(y)$ no es suficientemente fiable (ver B.2) entonces los grados efectivos de libertad ν_{eff} deben determinarse mediante la fórmula de Welch-Satterthwaite, y $k > 2$ se obtiene de la tabla adecuada, según [1].

3.2. Distribución no normal

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

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

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

para una distribución trapezoidal con $\beta < 0.95$ ($\beta = \text{parámetro de apuntamiento, cociente entre el menor y el mayor de los lados paralelos del trapecio}$):

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

para la distribución rectangular ($\beta = 1$): $k = 1.65$ - ver [1]

para la distribución triangular ($\beta = 0$): $k = 1.90$

para la distribución en forma de U: $k = 1.41$

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

FORMULAS QUE DESCRIBEN LOS ERRORES EN RELACIÓN A LAS INDICACIONES

| | |
|--|---|
| 1. OBJETIVO | 1 |
| 2. RELACIONES FUNCIONALES | 1 |
| 2.1. INTERPOLACIÓN | 1 |
| 2.2. APROXIMACIÓN..... | 2 |
| 2.2.1. Aproximación por polinomios | 2 |
| 2.2.2. Aproximación por una línea recta | 4 |
| 3. TÉRMINOS SIN RELACIÓN CON LAS LECTURAS..... | 6 |
| 3.1. Error medio | 6 |
| 3.2. Error máximo..... | 6 |

1. OBJETIVO

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

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

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

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

2. RELACIONES FUNCIONALES

2.1. Interpolación

Hay varias fórmulas polinómicas para la interpolación⁴, entre valores tabulados para respecto de argumentos equidistantes, que son relativamente fáciles de usar. Las cargas de prueba, sin embargo, pueden, en muchos casos, no ser equidistantes, lo que conlleva fórmulas de interpolación bastante complicadas si se desea una sola fórmula que cubra todo el alcance de pesaje.

Se puede realizar la interpolación lineal entre dos puntos adyacentes mediante

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

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

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

⁴ Se entiende que una fórmula de interpolación proporciona exactamente los valores originales entre los que se realiza la interpolación.

Una fórmula de aproximación no proporcionará exactamente, de forma normal, los valores originales.

2.2. Aproximación

La aproximación debería realizarse mediante cálculos o algoritmos basados en el enfoque de "mínima χ^2 ":

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

con

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

v_j = residuo

f = función de aproximación que tiene n_{par} parámetros

Junto con los coeficientes de la función de aproximación, debe determinarse la suma de los cuadrados de las desviaciones según (C.2.2-1), que está designada por el término $\min \chi^2$. Esto permite comprobar la validez de la aproximación.

Si se cumple la condición:

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

con

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

β = factor escogido como 1, 2 (valor más aplicado), o 3,

está justificado suponer que la forma de la función modelo $E(l)$ es consistente matemáticamente con los datos en que se basa la aproximación.

2.2.1. Aproximación por polinomios

La aproximación por un polinomio da la función general

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

El subíndice/exponente n_a de los coeficientes debería escogerse de forma que $n_{par} = n_a + 1 \leq n/2$.

El cálculo se realiza de manera óptima en forma matricial.

Sea X una matriz cuyas n filas son $(1, l_j, l_j^2, \dots, l_j^{n_a})$
 a un vector columna cuyas componentes son los coeficientes a_0, a_1, \dots, a_{n_a} del polinomio de aproximación
 e un vector columna cuyas n componentes son los E_j
 $U(e)$ la matriz de incertidumbre de los E_j .

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

La matriz de ponderación P es

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

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

$$\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X} \mathbf{a} - \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{e} = \mathbf{0} \quad (\text{C.2.2-5})$$

con solución

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

Las n desviaciones $v_j = f(l_j) - E_j$ forman el vector

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

y $\min \chi^2$ se obtiene mediante

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

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

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

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

- a: repetir la aproximación con un número mayor de coeficientes n_a , siempre que $n_a + 1 \leq n/2$;
- b: repetir la aproximación después de aumentar todos los valores u_j , por ejemplo multiplicando por un factor $c > 1$ adecuado. ($\min \chi^2$ es proporcional a $1/c^2$)

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

Los errores $E_{appr,j}$ forman el vector

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

con incertidumbres dadas por

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

También sirven para determinar el error y la incertidumbre asignada de cualquier otra indicación (llamada una lectura R para distinguirla de las indicaciones l_j) dentro del alcance de pesada calibrado.

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

El error es

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

y su incertidumbre viene dada por

$$u^2(E_{appr}) = (\mathbf{r}'^T \mathbf{a}) \mathbf{U}(\mathbf{a}) (\mathbf{r}'^T \mathbf{a})^T + \mathbf{r} \mathbf{U}(\mathbf{a}) \mathbf{r}^T \quad (\text{C.2.2-13})$$

El primer término del miembro derecho se simplifica, ya que las tres matrices son unidimensionales, a

$$(\mathbf{r}^T \mathbf{a}) \mathbf{U}(R) (\mathbf{r}^T \mathbf{a})^T = (a_1 + 2a_2R + 3a_3R^2 + \dots + n_a a_{n_a} R^{n_a-1})^2 u^2(R) \quad (\text{C2.2-14})$$

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

2.2.2. Aproximación por una línea recta

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

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

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

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

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

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

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

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

A continuación se dan otras posibilidades.

2.2.2.1. La regresión lineal según (C2.2-12) puede realizarse en muchas calculadoras de bolsillo.

La correspondencia entre resultados es típicamente,

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

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

2.2.2.2. Para facilitar la programación de los cálculos con ordenador en notación no matricial, se dan a continuación las fórmulas necesarias. Todas las fórmulas incluyen los factores de ponderación $p_j = 1/u^2(E_j)$

Por simplicidad, se han omitido todos los índices "j" en I, E, p

a) regresión lineal (C2.2-15)

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

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

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

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

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

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

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

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

b) regresión lineal con $a_0 = 0$

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

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

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

(C.2.2-16) se aplica al error mediante aproximación de la lectura R , y la incertidumbre asignada $u(E_{\text{appr}})$ viene dada por

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

c) media de los gradientes

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

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

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

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

(C.2.2-16) se aplica al error mediante aproximación de la lectura R que también puede ser una indicación neta, y la incertidumbre de la aproximación $u(E_{appr})$ viene dada por

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

3. TÉRMINOS SIN RELACIÓN CON LAS LECTURAS

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

3.1. Error medio

La media de todos los errores es

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

con la desviación típica

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

Nota: el punto experimental $l = 0$, $E = 0$ debe incluirse como l_1 , E_1 .

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

3.2. Error máximo

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

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

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

- 3.2.2.** Suponiendo una distribución rectangular de todos los errores en el rango (ficticio) $\pm E_{\max}$, E° podría definirse como la desviación típica de los errores

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

que se insertaría en (7.5.2-2a).

SÍMBOLOS Y TÉRMINOS

| | | |
|------|--|---|
| 1. | SÍMBOLOS DE APLICACIÓN GENERAL..... | 1 |
| 2. | UBICACIONES DE TÉRMINOS Y EXPRESIONES IMPORTANTES..... | 3 |
| 2.1. | Pruebas de calibración y resultados de medida..... | 3 |
| 2.2. | Resultados de pesada obtenidos por el usuario del instrumento..... | 4 |

1. SÍMBOLOS DE APLICACIÓN GENERAL

Los símbolos que se usan en más de una sección del documento principal, se listan 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 de un instrumento | g, kg, t |
| Max | capacidad máxima de pesaje | g, kg, t |
| Max' | límite superior de un rango de pesaje especificado, $Max' < Max$ | g, kg, t |
| Min | valor de la carga por debajo del cual el resultado de pesada puede estar afectado por un error relativo excesivo | g, kg, t |
| Min' | límite inferior de un rango de pesaje especificado, $Min' > Min$ | g, kg, t |
| R | indicación (lectura) de un instrumento, que no está relacionada 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, pesada en el aire | g, kg, t |
| d | escalón, diferencia en masa entre dos indicaciones consecutivas del dispositivo indicador | g, kg, t |
| d_T | escalón efectivo $< d$, usado en las pruebas de calibración | g, kg, t |
| k_x | número de elementos 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 un patrón de masa | g, kg, t |
| m_N | valor nominal de masa convencional de un patrón de masa | g, kg, t |
| m_{ref} | peso de referencia ("valor verdadero") de una carga de prueba | g, kg, t |
| mpe | error máximo permitido (de una indicación, un patrón de masa, etc.) en un contexto dado | g, kg |
| n | número de elementos, según se indica en cada caso | |
| s | desviación típica | |
| t | tiempo | h, min |
| u | incertidumbre típica | |
| \hat{W} | incertidumbre típica relativa a una magnitud de base | |
| ν | número de grados de libertad | |
| ρ | densidad | kg/m ³ |
| ρ_0 | densidad de referencia del aire, $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$ | kg/m ³ |
| ρ_a | densidad del aire | kg/m ³ |
| ρ_c | densidad de referencia de un patrón de masa, $\rho_c = 8000 \text{ kg/m}^3$ | kg/m ³ |

| Subíndice | relacionado con |
|------------------|--|
| <i>B</i> | empuje del aire |
| <i>D</i> | deriva |
| <i>N</i> | valor nominal |
| <i>T</i> | prueba |
| <i>adj</i> | ajuste |
| <i>appr</i> | aproximación |
| <i>cal</i> | calibración |
| <i>conv</i> | convección |
| <i>dig</i> | digitalización |
| <i>ecc</i> | carga excéntrica |
| <i>gl</i> | global |
| <i>i</i> | numeración |
| <i>instr</i> | instrumento de pesaje |
| <i>j</i> | numeración |
| <i>max</i> | máximo valor de una población dada |
| <i>min</i> | mínimo valor de una población dada |
| <i>proc</i> | procedimiento de pesada |
| <i>ref</i> | referencia |
| <i>rep</i> | repetibilidad |
| <i>s</i> | patrón (masa); real en el momento del ajuste |
| <i>sub</i> | carga de sustitución |
| <i>tare</i> | operación de tara |
| <i>temp</i> | temperatura |
| <i>time</i> | tiempo |
| 0 | cero, sin carga |

2. UBICACIONES DE TÉRMINOS Y EXPRESIONES IMPORTANTES

2.1. Pruebas de calibración y resultados de medida

| Magnitud | Componentes de incertidumbre típica | Secciones, subsecciones |
|---|--|--|
| Indicación I_j para una carga de prueba discreta m_j | | 4.4.1; 6.2.1 |
| Indicación I $I = I_L + \delta I_{digL} + \delta I_{rep} + \delta I_{ecc} - I_0 - \delta I_{dig0}$ $u^2(I) = u^2(\delta I_{digL}) + u^2(\delta I_{rep}) + u^2(\delta I_{ecc}) + u^2(\delta I_{dig0})$ | $u(I)$ que consiste en $d_0/\sqrt{12} + d_L/\sqrt{12}$ para el redondeo, s or s_{pool} para la repetibilidad, $\hat{w}(I_{ecc})I$ para la excentricidad de la 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 Media de n indicaciones: $\bar{I}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{ji}$ | desviación típica: $s(I_j) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{ji} - \bar{I}_j)^2}$ | 4.4; 6.1 |
| Excentricidad $\Delta I_{ecc} = I_i - I_1$ | $\hat{w}(I_{ecc}) = \Delta I_{ecc, i} _{\max} / (2L_{ecc}\sqrt{3})$ | 6.3; 7.1.1.4 |
| Masa de referencia m_{ref} $m_{ref} = m_N + \delta m_c + \delta m_B + \delta m_D + \delta m_{conv}$ $u^2(m_{ref}) = u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D) + u^2(\delta m_{conv})$ Para cargas de prueba L_{Tn} que incluyen cargas de substitución: $u^2(L_{Tn}) = n^2 u^2(m_{c1}) + 2 \sum_{j=1}^n u^2(I_{j-1})$ | $u(m_{ref})$ que consiste en $u(\delta m_c)$ o $\hat{w}(\delta m_c)$ para la calibración $\hat{w}(\delta m_B)$ para el empuje del aire, $u(\delta m_D)$ para la deriva $u(\delta m_{conv})$ para la convección $u(m_{c1}) = u(m_{ref})$ como previamente $u(I_{j-1}) = u(I(L_{Tj-1}))$ | 4.3; 7.1 7.1.2, 7.1.2.5 + 6 7.1.2.1; 7.1.2.2, Ap. I + V 7.1.2.3 7.1.2.4, Ap. VI 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 |
| Característica $E_{appr} = f(I)$, basada en conjuntos de datos I_j , E_j , $u(E_j)$ $u(E_{appr}) = g(I)$ | $u(E_{appr})$ que resulta del cálculo de la aproximación | 6.2; 7.2; Ap. III |
| Incertidumbre expandida: $U(E) = ku(E)$ con $k = 2$ (distribución normal) o $k \neq 2$ | | 7.3; Ap. II |

2.2. Resultados de pesada obtenidos por el usuario del instrumento

| Magnitud | Componentes de incertidumbre típica | Secciones, subsecciones |
|--|--|---|
| Lecturas del usuario: $R = R_L + \delta R_{digL} + \delta R_{rep} - R_0 - \delta R_{dig0} (+ \delta R_{ecc})$ $u^2(R) = u^2(\delta R_{digL}) + s^2 + u^2(\delta R_{dig0})$ | como $u(l)$ precedente, basada en d y no en d_T | 7.4 7.4.1 |
| Error asociado a la lectura: $E(R) = E(I_j)$, y $u(E_{cal})$ según el 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 previamente $u[E_{appr}(R)] = U[E_{appr}(R)]/k_{cal}$ | 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 cotidiano: $W = W^* + \delta R_{instr} + \delta R_{proc}$ $u^2(W) = u^2(W^*) + u^2(\delta R_{instr}) + u^2(\delta R_{proc})$ δR_{instr} y δR_{proc} para los efectos del ambiente y manejo del instrumento diferentes de la situación durante la calibración | $u(W^*)$ que consiste en $u(R)$ como previamente $u(E(R))$ como previamente $u(\delta R_{instr})$ que comprende $\hat{W} (R_{temp})$ para la temperatura $\hat{W} (R_{buoy})$ para la variación de la densidad del aire $\hat{W} (R_{adj})$ para la deriva a largo plazo $u(\delta R_{proc})$ que comprende $\hat{W} (R_{Tare})$ $\hat{W} (R_{time})$ $\hat{W} (R_{ecc})$ 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) o $k \neq 2$ $U(W) = ku(W)$ con $k = 2$ | | 7.5, Ap. B |
| Resultado de pesada con corrección: $W = R - E \pm U(W)$ | $U(W)$ de lo precedente | 7.5.1 |
| Resultado de pesada sin corrección: $W = R \pm U_{gl}(W)$ con $U_{gl}(W) = f\{U(W) + E(R)\}$ | $U(W)$ de lo precedente, ampliada con el término que representa $E(R)$ | 7.5.2 |
| Resultado de pesada dentro de límites especificados: $W = R \pm Tol(R)$ con Tol especificada por el cliente, bajo condiciones tales que $ E(R) + U(W(R)) \leq Tol(R)$ | | 7.5.3 |
| Conversión de W a masa m, o a masa convencional m_c | a calcular por el usuario del instrumento en base a W | 9.1 9.2 |

INFORMACIÓN SOBRE EL EMPUJE DEL AIRE EN EL CASO DE PATRONES DE MASA

| | | |
|----|---|---|
| 1. | DENSIDAD DE LOS PATRONES DE MASA | 1 |
| 2. | EJEMPLOS PARA EL EMPUJE DEL AIRE EN GENERAL | 1 |
| 3. | EMPUJE DEL AIRE PARA PESAS CONFORMES A R111 | 2 |

Este Anexo da información adicional sobre la corrección por empuje del aire tratada en 7.1.2.2. Se concentra en la incertidumbre típica de la corrección, ya que 7.1.2.2 aconseja aplicar una corrección de valor $\delta m_B = 0$ con una desviación típica adecuada.

1. DENSIDAD DE LOS PATRONES DE MASA

Cuando no se conocen la densidad ρ de un patrón de masa, ni su incertidumbre típica $u(\rho)$, pueden usarse los siguientes valores para las pesas de las clases E₂ a M₂ de R111 (tomados de [4], Tabla B7).

| Aleación/material | Densidad supuesta ρ en kg/m ³ | Incertidumbre típica $u(\rho)$ en kg/m ³ |
|-------------------------|--|--|
| níquel plata | 8600 | 85 |
| bronce | 8400 | 85 |
| acero inoxidable | 7950 | 70 |
| acero carbonado | 7700 | 100 |
| hierro | 7800 | 100 |
| hierro fundido (blanco) | 7700 | 200 |
| hierro fundido (gris) | 7100 | 300 |
| aluminio | 2700 | 65 |

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

2. EJEMPLOS PARA EL EMPUJE DEL AIRE EN GENERAL

La tabla E2.1 da incertidumbres típicas relativas para una corrección de empuje del aire supuesta nula, para

- pesas hechas de las aleaciones/materiales mencionadas en E1
- incertidumbre típicas seleccionadas de la densidad del aire; ver 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) por 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 supuesto $u(\delta\rho_{as}) = 0,5 u(\rho_a)$.

Es obvio que para el caso A la incertidumbre relativa $\hat{w}(m_B)$ está siempre por debajo 0,4 mg/kg para los materiales normalmente utilizados para las pesas de mayor exactitud (acero inoxidable actualmente, anteriormente bronce), y solamente necesita considerarse en el caso de calibraciones con incertidumbres extremadamente pequeñas.

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

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

| $\hat{w}(m_B)$ en mg/kg para el caso A | | | $\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$ con $u(\rho_a)$ menor que | | | |
|--|--------|-----------|---|-------|------|-------|
| Material | ρ | $u(\rho)$ | 0,016 | 0,025 | 0,04 | 0,064 |
| níquel plata | 8600 | 85 | 0,14 | 0,22 | 0,35 | 0,56 |
| bronce | 8400 | 85 | 0,10 | 0,15 | 0,24 | 0,39 |
| acero inoxidable | 7950 | 70 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,09 |
| hierro fundido (blanco) | 7700 | 200 | 0,09 | 0,15 | 0,24 | 0,38 |
| hierro fundido (gris) | 7100 | 300 | 0,27 | 0,42 | 0,68 | 1,08 |
| aluminio | 2700 | 65 | 3,93 | 6,14 | 9,82 | 15,71 |

| $\hat{w}(m_B)$ en mg/kg para el caso B1 | | | $\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$ con $u(\rho_a)$ menor que | | | |
|---|--------|-----------|---|-------|-------|-------|
| Material | ρ | $u(\rho)$ | 0,016 | 0,025 | 0,04 | 0,064 |
| níquel plata | 8600 | 85 | 1,01 | 1,58 | 2,52 | 4,04 |
| bronce | 8400 | 85 | 1,01 | 1,57 | 2,51 | 4,02 |
| acero inoxidable | 7950 | 70 | 1,00 | 1,56 | 2,50 | 4,00 |
| hierro fundido (blanco) | 7700 | 200 | 1,00 | 1,57 | 2,51 | 4,01 |
| hierro fundido (gris) | 7100 | 300 | 1,03 | 1,61 | 2,58 | 4,13 |
| aluminio | 2700 | 65 | 4,05 | 6,33 | 10,13 | 16,21 |

| $\hat{w}(m_B)$ en mg/kg para el caso B2 | | | $\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$ con $u(\rho_a)$ menor que | | | |
|---|--------|-----------|---|-------|-------|-------|
| Material | ρ | $u(\rho)$ | 0,016 | 0,025 | 0,04 | 0,064 |
| níquel plata | 8600 | 85 | 1,86 | 2,91 | 4,65 | 7,44 |
| bronce | 8400 | 85 | 1,90 | 2,98 | 4,76 | 7,62 |
| acero inoxidable | 7950 | 70 | 2,01 | 3,14 | 5,03 | 8,05 |
| hierro fundido (blanco) | 7700 | 200 | 2,08 | 3,25 | 5,20 | 8,31 |
| hierro fundido (gris) | 7100 | 300 | 2,26 | 3,52 | 5,64 | 9,02 |
| aluminio | 2700 | 65 | 5,93 | 9,26 | 14,82 | 23,71 |

3. EMPUJE DEL AIRE PARA PESAS CONFORMES A R111

Como se cita en la nota de 7.1.2.2, R 111 establece que la densidad de las pesas debe encontrarse dentro de ciertos límites que están relacionados con el máximo error permitido mpe y una variación específica de la densidad del aire. Los mpe son proporcionales al valor nominal para pesas ≥ 100 g. Esto permite formar 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, se han evaluado en la tabla E2.2, en relación con las clases de exactitud E_2 a M_1 .

Para las pesas de $m_N \leq 50$ g los mpe están tabulados en R111, con el valor relativo mpe/m_N aumentando conforme la masa decrece. Para estas pesas, la tabla E2.2 contiene las incertidumbres típicas 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 de la tabla E2.1. Esto se debe a que las incertidumbres supuestas $u(\rho)$ and $u(\rho_0)$ son mayores en la tabla E2.2.

Los valores de la tabla E2.2 pueden usarse para una estimación "de peor caso" de la contribución de incertidumbre del empuje del aire en una situación dada.

Tabla E2.2: Incertidumbre típica de la corrección por empuje del aire para pesas conformes a R 111

Calculadas según 7.1.2.2 para los casos A (7.1.2-5a) y B (7.1.2-9a)

| m_N en g | Clase E ₂ | | | Clase F ₁ | | | Clase F ₂ | | | Clase M ₁ | | |
|--|----------------------|-------------|-------------|----------------------|-------------|-------------|----------------------|-------------|-------------|----------------------|-------------|-------------|
| | 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 | 0,016 | 0,002 | 0,003 | 0,05 | 0,007 | 0,008 | 0,16 | 0,02 | 0,02 | 0,5 | 0,07 | 0,07 |
| <u>mpe relativos e incertidumbres típicas relativas $\hat{w}(m_B)$ en mg/kg para pesas de 100g y mayores</u> | | | | | | | | | | | | |
| | Clase E ₂ | | | Clase F ₁ | | | Clase F ₂ | | | Clase M ₁ | | |
| | mpe/m_N | \hat{w}_A | \hat{w}_B |
| ≥ 100 | 1,60 | 0,23 | 8,89 | 5,00 | 0,72 | 9,38 | 16,0 | 2,31 | 11,0 | 50,0 | 7,22 | 15,88 |

EFFECTOS DE LA CONVECCIÓN

| | | |
|------|--|---|
| 1. | RELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO..... | 1 |
| 1.1. | Pesas patrón e instrumento de control..... | 2 |
| 1.2. | Masas de transferencia. | 2 |
| 2. | CAMBIO DE MASA APARENTE | 4 |

En 4.3.3 se indica que los efectos de la convección se deben minimizar, permitiendo a las pesas y cargas de prueba alcanzar la temperatura del entorno. Estos efectos pueden ser relevantes para pesas de clases E_2 y F_1 . En el Anexo VI de la guía G-ENAC-13, sobre los efectos de la convección, se tratan dos aspectos: La relación entre la temperatura y el tiempo y el cambio de la masa aparente.

A continuación se presenta información más detallada, para permitir evaluar las situaciones en las que debe tomarse en cuenta el efecto de la convección para obtener la incertidumbre de calibración. Las tablas están extraídas del anexo VI de G-ENAC-13.

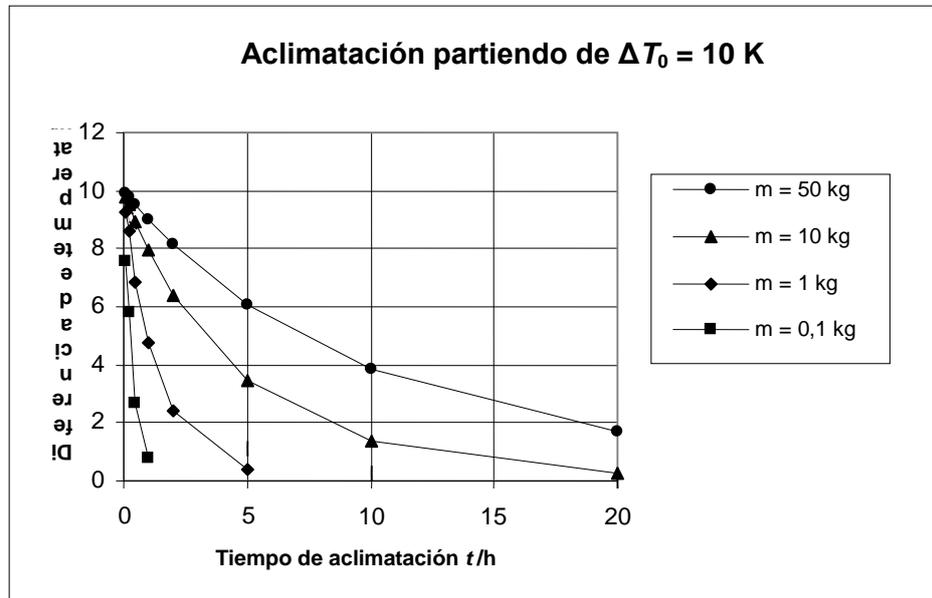
El problema que se trata aquí es bastante complejo, tanto en la física de base como en la evaluación de los resultados experimentales. No debe sobreestimarse la precisión de los valores que se presentan a continuación.

1. RELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO

Una diferencia de temperatura inicial ΔT_0 se reduce con el tiempo Δt por intercambio de calor entre la masa de transferencia y el aire que la rodea. La velocidad de intercambio de calor es razonablemente independiente del signo de ΔT_0 , y por ello el calentamiento o enfriamiento de una pesa se produce en intervalos de tiempo similares.

La figura F.1.1 proporciona algunos ejemplos del efecto de aclimatación. Partiendo de una diferencia de temperatura inicial de 10 K, se muestra, para cuatro diferentes pesas, la ΔT real después de diferentes tiempos de aclimatación. Se supone que las pesas reposan sobre tres columnas, bastante delgadas, de PVC en "aire libre".

Figura F1.1: Aclimatación de pesas



Los efectos de convección afectarán a:

- Las pesas patrón utilizadas para la calibración del instrumento de control y para los ensayos en estático, y
- A las diferentes masas de transferencia que serán utilizadas en los ensayos dinámicos.

1.1. Pesas patrón e instrumento de control.

Puede haber una diferencia de temperatura entre las pesas patrón y el instrumento de control, o entre las pesas y el instrumento sometido a ensayo cuando se realizan los ensayos en estático que provocarían un cambio aparente de la masa. Según lo indicado en el punto 4.3.3 de la guía, se tomarán las medidas necesarias según lo indicado en G-ENAC-13 para minimizar estos efectos.

1.2. Masas de transferencia.

Se parte de la base de que las masas de transferencia cumplen con las características indicadas en el punto 4.4.2 de esta guía. Habitualmente, en el caso más desfavorable, estas masas de transferencia estarán fabricadas por materiales de baja densidad, como por ejemplo cajas de cartón o algún material parecido, que contienen el producto a pesar.

En la tabla F1.2, podemos ver las propiedades de diferentes materiales:

Tabla F1.2 Propiedades diferentes materiales

| Material | Densidad ρ [kg.m ⁻³] | Conductividad térmica k [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] |
|------------------|--|--|
| Acero | 7830 | 45.3 |
| Aluminio pulido | 2710 | 205 |
| Arcilla | 1000 | 1.3 |
| Arena | 1520 | 0.33 |
| Carbón | 1400 | 0.17 |
| Carbón de madera | 240 | 0.05 |
| Cemento | 1920 | 0.3 |
| Cloruro sódico | 2164 | 7 |
| Cobre | 8910 | 393 |
| Corcho | 86 | 0.05 |
| Cuero | 1000 | 0.16 |
| Goma | 1100 | 0.1 |
| Hierro | 7210 | 47.7 |
| Lana | 110 | 0.05 |
| Latón | 8780 | 150 |
| Madera de roble | 750 | 0.17 |
| Madera de pino | 430 | 0.15 |
| Papel | 930 | 0.13 |
| Serrín | 190 | 0.05 |
| Vidrio pyrex | 2230 | 1 |
| Vidrio (lana) | 52 | 0.038 |
| Yeso | 2290 | 0.83 |

La conductividad térmica es una propiedad intrínseca de cada material, que valora la capacidad de conducir el calor a través de ellos. Como se puede observar, no todos los materiales tienen la misma facilidad para conducir el calor. Hay materiales que son mejores conductores del calor que otros.

En concreto, los materiales que se suelen utilizar para la fabricación de las pesas patrón (acero, hierro, latón, aluminio) tienen una conductividad del orden de $45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, mientras que otros materiales como el papel, madera, vidrio, corcho, se quedan en valores inferiores a $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, es decir, tienen una conductividad muy inferior y por tanto son mucho más lentos a la hora de variar su temperatura para adaptarse al medio en el que se encuentran.

Se pueden dar varios casos:

- a) Las masas de transferencia son artículos ya preparados para la calibración, y se encuentran en las instalaciones del cliente, en una zona cercana al instrumento a calibrar y al instrumento de control: todos se encontrarán a una temperatura bastante parecida y no será necesario el tiempo de aclimatación. Así, los efectos de la convección serán mínimos y no se tendrán en cuenta estos efectos ni siquiera en la calibración de la masa de transferencia.
- b) Las masas de transferencia se han calibrado previamente en las instalaciones permanentes del laboratorio, y se llevan junto al instrumento en el mismo momento de la calibración.

En el caso de haber una variación de la temperatura durante el traslado, esta debería ser inferior a la reflejada en las pesas (metálicas), pues las muestras pueden tener conductividad térmica menor que las pesas. Aunque les sea más difícil disminuir su temperatura durante el proceso de aclimatación, al partir de una diferencia de temperatura inferior, se podría pensar que el tiempo de aclimatación será parecido al de las pesas y por tanto utilizar la misma tabla F1.3.

La tabla F1.3 da los tiempos de aclimatación Δt que puede ser necesario esperar si la diferencia de temperatura de las pesas patrón quiere reducirse de un valor ΔT_1 a un valor inferior ΔT_2 . Las condiciones de intercambio de calor son las mismas que en la figura F1.1: La tabla F1.3 para " $m = 0,1 \text{ kg}$ " a " $m = 50 \text{ kg}$ ".

Por los razonamientos precedentes se considera que este tiempo también es adecuado para las masas de transferencia.

Además, es de esperar que en condiciones reales, los tiempos de aclimatación serán inferiores, pues las muestras descansarán sobre una superficie mejor conductora del calor que los soportes de PVC utilizados.

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

| Tiempo de aclimatación en min para alcanzar ΔT a partir de la ΔT inmediatamente superior | | | | | | | | |
|--|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| m/kg | $\Delta T/\text{K}$ | | | | | | | |
| | 20 | 15 | 10 | 7 | 5 | 3 | 2 | 1 |
| 50 | | 149,9 | 225,3 | 212,4 | 213,1 | 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:

reducir ΔT de 20 K a 15 K requiere 20,8 min;

reducir ΔT de 15 K a 10 K requiere 30,7 min;

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

4. CAMBIO DE LA MASA APARENTE

Tal y como se indica en el anexo VI de la guía G-ENAC-13, el flujo de aire generado por una diferencia de temperatura ΔT se dirige hacia arriba cuando la masa de transferencia está más caliente ($\Delta T > 0$) que el aire que la rodea, y hacia abajo cuando está más fría ($\Delta T < 0$). El flujo de aire provoca fuerzas de fricción sobre la superficie vertical de la carga, y fuerzas que empujan o tiran de sus superficies horizontales, que resultan en un cambio Δm_{conv} de la masa aparente.

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

La tabla F2.1 da los valores para Δm_{conv} para pesas, para las diferencias de temperatura ΔT que aparece en la tabla F1.3. Estos valores deben considerarse como estimaciones de los efectos que pueden esperarse en una calibración real.

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

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

Los valores de esta tabla pueden compararse con la incertidumbre de calibración, o con la incertidumbre de las masas de transferencia que se utilizan en una calibración, para valorar si un valor de ΔT real puede producir un cambio significativo de la masa aparente.

Aunque esta tabla se refiere a pesas patrón, si se toman estos mismos valores para las masas de transferencia, y haciendo las siguientes suposiciones:

- la incertidumbre de la calibración de la seleccionadora está por encima de 1 escalón (cosa que generalmente ocurre),
- la incertidumbre de la calibración de la masa de transferencia es equivalente a una clase M_1 , que sería una situación bastante optimista teniendo en cuenta el tipo de carga que se suele usar,
- una variación de temperatura de $\Delta T = 10$ °C contando que además se ha dejado un tiempo previo para que se establezca la temperatura,

se puede observar que el cambio de la masa aparente para diferentes ejemplos de instrumentos es prácticamente despreciable.

Ejemplos:

| Max = 200 g ; d= 10 mg ; 20000 divisiones | | | |
|---|------------------------|----------------|--------------------|
| Nominal | Δm_{conv} (mg) | U_{cal} (mg) | U_p (M_1) mg |
| 10 g | 0,05 | 10 | 0,6 |
| 50 g | 0,17 | 10 | 0,8 |
| 100 g | 0,29 | 10 | 1,0 |
| 200 g | 0,51 | 10 | 1,6 |

| Max = 5000 g ; d= 0,5 g ; 10000 divisiones | | | |
|--|------------------------|----------------|--------------------|
| Nominal | Δm_{conv} (mg) | U_{cal} (mg) | U_p (M_1) mg |
| 20 g | 0,08 | 500 | 0,8 |
| 500 g | 1,09 | 500 | 8,0 |
| 2000 g | 3,53 | 500 | 30 |
| 5000 g | 7,79 | 500 | 80 |

| Max = 20 kg ; d= 2 g ; 10000 divisiones | | | |
|---|------------------------|----------------|--------------------|
| Nominal | Δm_{conv} (mg) | U_{cal} (mg) | U_p (M_1) mg |
| 0,1 kg | 0,29 | 2000 | 1,6 |

| | | | |
|-------|-------|------|-----|
| 2 kg | 3,53 | 2000 | 30 |
| 10 kg | 14,30 | 2000 | 160 |
| 15 kg | 26,43 | 2000 | 240 |

| 30 kg ; d= 5 g ; 6000 divisiones | | | |
|----------------------------------|------------------------|----------------|--------------------|
| Nominal | Δm_{conv} (mg) | U_{cal} (mg) | U_p (M_1) mg |
| 0,2 kg | 0,51 | 5000 | 3 |
| 5 kg | 7,79 | 5000 | 80 |
| 20 kg | 26,43 | 5000 | 300 |
| 30 kg | 60,23 | 5000 | 460 |

Se deberá valorar la variación de la masa convencional con respecto a la incertidumbre de calibración, o con la incertidumbre de las masas de transferencia que se utilizan en una calibración, para cada caso concreto, a fin de valorar si un valor de ΔT real puede producir un cambio significativo de la masa aparente.

EL EMPUJE DEL AIRE Y LA DETERMINACIÓN DE LAS MASAS DE TRANSFERENCIA EN LA CALIBRACIÓN DE SELECCIONADORAS PONDERALES

| | | |
|------|---|----|
| 1. | GENERALIDADES | 1 |
| 1.1. | Introducción y símbolos | 1 |
| 1.2. | Ajustes | 2 |
| 1.3. | Determinación del valor de la masa de transferencia..... | 2 |
| 1.4. | Formas de composición de las cargas de transferencia..... | 3 |
| 1.5. | Componentes adicionales de la incertidumbre..... | 4 |
| 1.6. | Valor de la carga de transferencia..... | 4 |
| 2. | Cargas de transferencia compuestas solamente por masas de transferencia | 6 |
| 2.1. | Todas las calibraciones y ajustes en el mismo momento..... | 6 |
| 2.2. | Calibración de las masas de transferencia, instrumento de control y seleccionadora ponderal realizada a la vez, pero con ajuste del instrumento de control realizado previamente..... | 7 |
| 2.3. | Calibración del instrumento de control realizada previamente..... | 8 |
| 2.4. | Calibraciones del instrumento de control y de la masa de transferencia realizadas previamente y a la vez | 10 |
| 2.5. | Calibraciones del instrumento de control y de la masa de transferencia realizadas previamente, de forma separada | 11 |
| 2.6. | Calibración realizada a la vez, con instrumento de control que previamente ha sido verificado..... | 12 |
| 3. | Cargas de transferencia compuestas por cargas mixtas | 13 |
| 3.1. | Todas las calibraciones y ajustes en el mismo momento..... | 14 |
| 3.2. | Calibración de las masas de transferencia, instrumento de control y seleccionadora ponderal realizada a la vez, pero con ajuste del instrumento de control realizado previamente..... | 14 |
| 3.3. | Calibración del instrumento de control realizada previamente..... | 16 |
| 3.4. | Calibraciones del instrumento de control y de la masa de transferencia realizadas previamente y a la vez | 17 |
| 3.5. | Calibraciones del instrumento de control y de la masa de transferencia realizadas previamente, de forma separada | 18 |
| 3.6. | Calibración realizada a la vez, con instrumento de control que previamente ha sido verificado..... | 19 |

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción y símbolos

En los apartados 4.4.2 y 7.1.2 se ha considerado solamente el caso en que la densidad de los patrones de masa es la de referencia, ρ_c , y la determinación del valor de las masas de transferencia se ha realizado como parte del proceso de calibración de la seleccionadora ponderal, habiéndose realizado en ese proceso todas las operaciones de ajuste y calibración.

En este Anexo se consideran casos más generales y complejos.

- ρ_{as1} densidad del aire en el momento del ajuste del instrumento de control,
- ρ_{as2} densidad del aire en el momento del ajuste de la seleccionadora ponderal,
- ρ_{aCal1} densidad del aire al calibrar el instrumento de control con patrones de masa,
- ρ_{aCal2} densidad del aire en el momento de la calibración de la seleccionadora ponderal,
- ρ_{at} densidad del aire al calibrar las masas de transferencia en el instrumento de control,
- ρ_0 densidad de referencia del aire, $1,2 \text{ kg/m}^3$,
- ρ_{Cal} densidad de los patrones de calibración,
- ρ_t densidad de las masas de transferencia,
- ρ_c densidad de referencia de las pesas, 8000 kg/m^3 ,
- m_N masa convencional de los patrones de masa de calibración del instrumento de control

| | |
|----------|--|
| m^1_N | masa convencional de los patrones en la carga simulada en la seleccionadora ponderal |
| R | lectura en carga del instrumento de control al poner la masa de transferencia |
| R_0 | lectura de cero del instrumento de control al poner la masa de transferencia |
| I_{L1} | indicación en carga del instrumento de control al poner el patrón de masa |
| I_{01} | indicación de cero del instrumento de control al poner el patrón de masa |

1.2. Ajustes

En todos los casos, y en lo que respecta al tratamiento y resultados en este anexo, lo que se indica para el ajuste de los instrumentos de pesaje aplica, igualmente, si se comprueba experimentalmente que no es necesario el ajuste y no se realiza. En ese caso, las menciones a los patrones utilizados en el ajuste deben entenderse como referidas a los patrones utilizados para la comprobación de que el ajuste no es necesario.

1.3. Determinación del valor de la masa de transferencia

Hay tres procedimientos diferentes para la determinación del valor de la masa de transferencia en el instrumento de control.

En el primero, las calibraciones del instrumento de control y de la masa de transferencia se realizan a la vez, y solamente hace falta realizar la del instrumento de control en los puntos correspondientes a las masas de transferencia. No hay términos correspondientes a la variación del ajuste del instrumento de control, ni a su variación de temperatura entre su calibración y la de las masas de transferencia. Desde el punto de vista de la calibración de la seleccionadora ponderal es indiferente que:

- a) se haya realizado primero una calibración del instrumento de control según G-ENAC-13 a esas cargas con el modo de aplicación discreto y luego el pesaje de las masas de transferencia se realice en el instrumento de control, teniendo en cuenta los errores certificados, o
- b) no se realicen calibraciones separadas del instrumento de control y las masas de transferencia, sino que, para cada una de las masas de transferencia se realicen ciclos de comparación entre la masa de transferencia y los patrones de masa. En general, teniendo en cuenta la incertidumbre buscada y lo establecido en OIML R111 C.4.3, un ciclo AB(B)A por masa de transferencia será suficiente.

Este primer procedimiento será el considerado en todos los casos de este anexo cuando se indique que la calibración del instrumento de control y de las masas de transferencia se realiza a la vez.

En el segundo procedimiento, se ha realizado primero una calibración del instrumento de control según G-ENAC-13 con el modo de aplicación discreto, o con un modo que se haya demostrado equivalente para ese instrumento y aplicación, y posteriormente se calibran las masas de transferencia por pesada directa en el instrumento de control, teniendo en cuenta los errores certificados. En este procedimiento hay términos correspondientes a la variación del ajuste del instrumento de control, y a su variación de temperatura entre su calibración y la de las masas de transferencia, y sus correspondientes incertidumbres, conforme a G-ENAC-13 7.4.3 y G-ENAC-17. Si el instrumento de control no forma parte su parque instrumental, el laboratorio necesita tener acceso a la información relativa a su calibración.

En el desarrollo de este Anexo se considera siempre que la calibración del instrumento de control se ha realizado a nominales suficientemente próximos a los de las masas de transferencia como para que el error del instrumento sea el mismo. Si esta condición no se cumpliera, el segundo procedimiento requeriría el uso de técnicas como las descritas en el Anexo III de G-ENAC-13, con sus componentes de incertidumbre asociadas, o podría utilizarse también el tercer procedimiento.

Este segundo procedimiento será el considerado en todos los casos de este anexo cuando se indique que la calibración del instrumento de control y de las masas de transferencia se realiza en momentos diferentes.

En el tercer procedimiento, se ha realizado primero:

- a) una calibración del instrumento de control según G-ENAC-13 con el modo de aplicación discreto, o con un modo que se haya demostrado equivalente para ese instrumento y aplicación, y se ha comprobado que los errores de calibración son inferiores a un determinado criterio, o
- b) se ha realizado una verificación legal, conforme a OIML R76 o EN 45501, del instrumento de control que, en general, será o se tratará como una verificación en servicio,

y posteriormente se calibran las masas de transferencia por pesada directa en el instrumento de control, sin tener en cuenta los errores del instrumento de control. En este procedimiento no hay términos correspondientes a la variación del ajuste del instrumento de control, y a su variación de temperatura entre su calibración y la de las masas de transferencia.

Este tercer procedimiento será el considerado en todos los casos de este anexo cuando se indique que el instrumento de control ha sido verificado, siendo la única diferencia entre los casos a) y b) que, en el primero, el error máximo aceptado se ha establecido privadamente en función del uso previsto y las características del instrumento y, en el segundo, se ha establecido legalmente.

1.4. Formas de composición de las cargas de transferencia

Hay dos formas de componer las cargas de transferencia:

- a) mediante masas de transferencia
- b) mediante masas de transferencia y pesas patrón

Los casos a) se tratan en los apartados 2 y los casos b) en los apartados 3, de acuerdo con el siguiente esquema:

| | Masas de transferencia | Masas de transferencia y pesas patrón |
|---|------------------------|---------------------------------------|
| Todas las calibraciones y ajustes en el mismo momento | 2.1 | 3.1 |
| Todas las calibraciones a la vez, pero ajuste del instrumento de control realizado previamente | 2.2 | 3.2 |
| Calibración del instrumento de control realizado previamente | 2.3 | 3.3 |
| Calibración del instrumento de control y la masa de transferencia realizadas previamente y a la vez | 2.4 | 3.4 |
| Calibración del instrumento de control y la masa de transferencia realizadas previamente, y separadamente | 2.5 | 3.5 |
| Calibraciones realizadas a la vez, con un instrumento de control que ha sido verificado previamente | 2.6 | 3.6 |

1.5. Componentes adicionales de la incertidumbre

Además de la componente de incertidumbre asociada al empuje del aire, que es la que se trata detalladamente en este anexo, otras componentes que influyen en el valor de la masa de referencia son las asociadas a los patrones de masa de referencia y las asociadas a las indicaciones del instrumento de control.

Las componentes asociadas a los patrones de masa de referencia se tratan en los apartados 7.1.2.1, 7.1.2.3 y las asociadas a las indicaciones del instrumento de control se tratan en el apartado 7.1.3.

Si la calibración de las masas de transferencia no se realiza en el momento de su utilización puede ser necesario tener en cuenta una componente de incertidumbre asociada a su deriva, a no ser que la diferencia de tiempo sea adecuadamente breve.

Esta componente, por analogía a la componente considerada en 7.1.2.3, tiene la expresión

$$u(\delta m_{Dt}) = D_t / \sqrt{3}$$

donde D_t es la deriva máxima admitida entre calibraciones de las masas de transferencia cuando son multiusos y calibradas periódicamente, o la deriva máxima esperada a medio plazo, cuando la calibración se ha realizado para un uso concreto, pero no es inmediato.

Si la calibración del instrumento de control no se realiza en el momento de la calibración de las masas de transferencia, puede ser necesario tener en cuenta componentes de incertidumbre correspondientes a la variación del ajuste del instrumento de control y a su variación de temperatura entre su calibración y la de las masas de transferencia, a no ser que la diferencia de tiempo sea adecuadamente breve.

La componente correspondiente a la variación del ajuste está descrita en G-ENAC-13 7.4.3.3 y tiene como expresión

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

La componente correspondiente a la variación de temperatura está descrita en G-ENAC-13 7.4.3.1 y tiene como expresión

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

En este anexo no se trata la componente asociada a la convección, que ya es tratada en el Anexo VI.

1.6. Valor de la carga de transferencia

Cuando la masa de transferencia se utiliza en la seccionadora ponderal, el valor de referencia se determina según 4.3.4-3

$$m_{ref2} = m_{cTra} + \delta m_{B2}$$

y cuando la masa de transferencia se ha colocado en el instrumento de control para determinar su valor se obtiene, ignorando términos de esperanza matemática nula,

$$m_{cTra} = R - R_0 - I_{L1} + I_{01} + m_N + \delta m_{B1} + m_N(\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \quad (4.4.2-1)$$

a partir de las ecuaciones 6.2-1a, 7.1.1-1, 7.1.2-1, 7.4-1a y 7.4-1b de G-ENAC-13, donde los símbolos se utilizan como en G-ENAC-13, con su mismo significado, excepto por los subíndices 1, que se refieren a que el instrumento de control, y t que se refieren a la masa de transferencia o el momento de la transferencia.

Substituyendo este valor en la ecuación precedente se obtiene

$$m_{ref2} = R_L - R_0 - I_{L1} + I_{01} + m_N + \delta m_{B1} + m_N(\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \delta m_{B2} \quad (4.4.2-2)$$

Centrándonos en los términos asociados al empuje del aire

$$\delta m_{B1} + m_N(\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \delta m_{B2} = \delta m_{BTot}, \text{ a partir de la ecuación 4.2.4-5 de G-ENAC-13,}$$

$$\delta m_{Bi} = -m_{cCal} [(\rho_{aCali} - \rho_0)(1/\rho_{Cali} - 1/\rho_c) + (\rho_{aCali} - \rho_{asi})/\rho_c]$$

y con $m_{cCal} = m_N$, $\rho_{Cal1} = \rho_{Cal}$ y $\rho_{Cal2} = \rho_t$

pueden escribirse como

$$\delta m_{BTot} = -m_N \left[(\rho_{aCal1} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{Cal}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{aCal1} - \rho_{as1}}{\rho_c} + (\rho_{aCal2} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{aCal2} - \rho_{as2}}{\rho_c} - (\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] \quad (4.4.2-3)$$

con incertidumbre típica relativa

$$\hat{w}^2(m_{BTot}) = u^2(\rho_{aCal1})(1/\rho_{Cal})^2 + (\rho_{aCal1} - \rho_0)^2 u^2(\rho_{Cal})/(\rho_{Cal})^4 + u^2(\rho_{as1})/(\rho_c)^2 + u^2(\rho_{aCal2})(1/\rho_t)^2 + u^2(\rho_{as2})/(\rho_c)^2 + u^2(\rho_{at})(1/\rho_t - 1/\rho_c)^2 + (\rho_{aCal2} - \rho_{at})^2 u^2(\rho_t)/(\rho_t)^4 \quad (G1.6-1)$$

Si las cargas contienen además patrones de masa, se obtiene, suponiendo que son de la misma densidad que las utilizadas en la calibración del instrumento de control

$$\delta m_{BTot} = -m_N \left[(\rho_{aCal1} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{Cal}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{aCal1} - \rho_{as1}}{\rho_c} + (\rho_{aCal2} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{aCal2} - \rho_{as2}}{\rho_c} - (\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] - m'_N \left[(\rho_{aCal2} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{Cal}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{aCal2} - \rho_{as2}}{\rho_c} \right]$$

con incertidumbre típica relativa

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = (m_N)^2 / (m_N + m'_N)^2 [u^2(\rho_{\text{aCal1}})(1/\rho_{\text{Cal}})^2 + (1/\rho_c)^2 u^2(\rho_{\text{as1}}) + u^2(\rho_{\text{at}})(1/\rho_t - 1/\rho_c)^2 + (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_{\text{at}})^2 u^2(\rho_a) / (\rho_c)^4] + [m_N (\rho_{\text{aCal1}} - \rho_0) + m'_N (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0)]^2 / (m_N + m'_N)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}}) / (\rho_{\text{Cal}})^4 + [m'_N (1/\rho_{\text{Cal}}) + m_N (1/\rho_t)]^2 / (m_N + m'_N)^2 u^2(\rho_{\text{aCal2}}) + (1/\rho_c)^2 u^2(\rho_{\text{as2}}) \quad (\text{G1.6-2})$$

2. CARGAS DE TRANSFERENCIA COMPUESTAS SOLAMENTE POR MASAS DE TRANSFERENCIA

2.1. Todas las calibraciones y ajustes en el mismo momento

Este caso corresponde al desarrollado en el apartado 4.4.2 y 7.1.2.2 del documento y se incluye aquí también, para su comparación con los casos siguientes.

En este caso, el pesaje de las masas de transferencia se realiza in situ y el ajuste del instrumento de control se realiza también in situ, como parte del proceso de calibración de la seleccionadora ponderal. Correspondería, por ejemplo, a una situación en que el laboratorio se desplaza con masas de referencia y utiliza un instrumento de control aportado in situ por el cliente, que el laboratorio ajusta y calibra como parte del proceso de calibración de la seleccionadora ponderal y también a una situación en que el laboratorio se desplaza con masas de referencia y con un instrumento de control propio que se ajusta y calibra previamente al uso.

La ecuación de partida es la general, establecida en el apartado 4.4

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \quad (4.4.2-3)$$

$$\left[(\rho_{\text{aCal1}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal1}} - \rho_{\text{as1}}}{\rho_c} + (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal2}} - \rho_{\text{as2}}}{\rho_c} - (\rho_{\text{at}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right]$$

Si los ajustes de los dos instrumentos de pesaje se han realizado en el mismo momento de la calibración puede suponerse que la densidad del aire se ha mantenido constante durante las diferentes operaciones de ajuste y pesaje, $\rho_{\text{aCal1}} = \rho_{\text{as1}} = \rho_{\text{aCal2}} = \rho_{\text{as2}} = \rho_{\text{at}}$ y adoptamos para todas ellas el símbolo ρ_a .

Entonces, los términos de empuje quedan como

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N (\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} - \frac{1}{\rho_t} + \frac{1}{\rho_c} \right) = -m_N (\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) \quad (4.4.2-4)$$

que es exactamente la misma expresión (G-ENAC-13, 4.2.4-4) que obtendríamos si la calibración de la seleccionadora ponderal se hubiese realizado con las mismas pesas patrón que se han utilizado para la calibración del instrumento de control, en lugar de hacerlo con la masa de transferencia. Por lo tanto, cuando todas las operaciones de ajuste y pesaje se realizan en el mismo momento de la calibración de la seleccionadora, no es preciso conocer la densidad de la masa de transferencia y no aporta ninguna contribución al empuje del aire, ni a su incertidumbre.

Su incertidumbre típica relativa es

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_a) (1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_c)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}}) / (\rho_{\text{Cal}})^4 \quad (7.1.2-5)$$

Para una densidad del aire de $1,1 \text{ kg/m}^3$ y una densidad de las masas de referencia de 7950 kg/m^3 , con incertidumbres $0,03 \text{ kg/m}^3$ y 70 kg/m^3 , respectivamente, la incertidumbre relativa sería del orden de $1,2 \times 10^{-7}$.

Y la expresión para el valor de la masa convencional de referencia queda como

$$m_{\text{ref}2} = R_L - R_0 - I_{L1} + I_{01} + m_N - m_N(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) \quad (4.4.2-2)$$

2.2. Calibración de las masas de transferencia, instrumento de control y seccionadora ponderal realizada a la vez, pero con ajuste del instrumento de control realizado previamente

Un caso, probablemente infrecuente, es aquel en que, si bien el pesaje de las masas de transferencia se realiza in situ, el ajuste del instrumento de control se ha realizado previamente en un momento distinto (y, en general, en un lugar distinto). Correspondería, por ejemplo, a una situación en que el laboratorio se desplaza con masas de referencia y utiliza un instrumento de control aportado in situ por el cliente, que no puede ajustar y también a una situación en que el laboratorio se desplaza con masas de referencia, con un instrumento de control propio que no se ajusta previamente al uso. El instrumento de control y las masas de transferencia se calibran simultáneamente.

La ecuación de partida es la general, establecida en el apartado 4.4

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_{\text{aCal1}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal1}} - \rho_{\text{as1}}}{\rho_c} + (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal2}} - \rho_{\text{as2}}}{\rho_c} - (\rho_{\text{at}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] \quad (4.4.2-3)$$

Si los ajustes de los dos instrumentos de pesaje se han realizado en el momentos distintos, la densidad del aire se ha mantenido constante solamente durante las operaciones de pesaje, $\rho_{\text{as1}} \neq \rho_{\text{as2}} \neq \rho_{\text{aCal1}} = \rho_{\text{aCal2}} = \rho_{\text{at}}$ y adoptamos solamente para las que son iguales el símbolo ρ_a , $\rho_a = \rho_{\text{aCal1}} = \rho_{\text{aCal2}} = \rho_{\text{at}}$.

Entonces, los términos de empuje quedan como

$$\begin{aligned} \delta m_{\text{BTot}} &= -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} - \frac{1}{\rho_t} + \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_a - \rho_{\text{as1}}}{\rho_c} + \frac{\rho_a - \rho_{\text{as2}}}{\rho_c} \right] \quad (G.2.2-1) \\ &= -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{2\rho_a - \rho_{\text{as1}} - \rho_{\text{as2}}}{\rho_c} \right] \end{aligned}$$

que sigue sin estar afectada por el material de transferencia, pero donde intervienen las densidades del aire en el momento del ajuste de los instrumentos.

Y su incertidumbre típica relativa es

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_a)(1/\rho_{\text{Cal}} + 1/\rho_c)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}})/(\rho_{\text{Cal}})^4 + u^2(\rho_{\text{as1}})(1/\rho_c)^2 + u^2(\rho_{\text{as2}})(1/\rho_c)^2 \quad (G.2.2-2)$$

Raramente se habrá realizado el ajuste de la seccionadora en un momento diferente al de la calibración, por lo que, habitualmente, se tendrá que $\rho_{as2} = \rho_a$

$$\delta m_{BTot} = -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{Cal}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{2\rho_a - \rho_{as1} - \rho_{as2}}{\rho_c} \right] = -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{Cal}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_a - \rho_{as1}}{\rho_c} \right] \quad (G.2.2-3)$$

con incertidumbre típica relativa

$$\hat{w}^2(m_{BTot}) = u^2(\rho_a)(1/\rho_{Cal})^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho_{Cal})/(\rho_{Cal})^4 + u^2(\rho_{as1})(1/\rho_c)^2 \quad (G.2.2-4)$$

Para una densidad del aire de $1,1 \text{ kg/m}^3$ y una densidad de las masas de referencia de 7950 kg/m^3 , con incertidumbres $0,03 \text{ kg/m}^3$ y 70 kg/m^3 , respectivamente, la incertidumbre relativa sería del orden de $5,3 \times 10^{-6}$.

2.3. Calibración del instrumento de control realizada previamente

Esta situación se dará cuando el instrumento de control ha sido calibrado y ajustado previamente y la determinación de la masa de transferencia se realiza in situ, durante la calibración de la seccionadora ponderal. Correspondería, por ejemplo, a una situación en que el laboratorio se desplaza sin masas de referencia y utiliza un instrumento de control calibrado aportado in situ por el cliente y también a una situación en que el laboratorio se desplaza sin masas de referencia, con un instrumento de control propio ya calibrado y que no se ajusta previamente al uso. La calibración de las masas de transferencia se realiza por pesada directa y se utilizan las correcciones de calibración del instrumento de control.

La ecuación de partida es la general, establecida en el apartado 4.4

$$\delta m_{BTot} = -m_N \left[(\rho_{aCal1} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{Cal}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{aCal1} - \rho_{as1}}{\rho_c} + (\rho_{aCal2} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{aCal2} - \rho_{as2}}{\rho_c} - (\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] \quad (4.4.2-3)$$

Si el instrumento de control ha sido calibrado previamente y el material de transferencia se pesa en el instrumento de control durante la calibración de la seccionadora ponderal, $\rho_{as1} \neq \rho_{as2} \neq \rho_{aCal1} \neq \rho_{aCal2} = \rho_{at}$, adoptando solamente para las que son iguales el símbolo ρ_a , $\rho_a = \rho_{aCal2} = \rho_{at}$.

Entonces, los términos de empuje de la ecuación 4.4.2-3 quedan como

$$\delta m_{BTot} = -m_N \left[(\rho_{aCal1} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{Cal}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{aCal1} - \rho_{as1}}{\rho_c} + \frac{\rho_a - \rho_{as2}}{\rho_c} \right] - m_N \left[(\rho_{aCal1} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{Cal}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{aCal1} - \rho_{as1} + \rho_a - \rho_{as2}}{\rho_c} \right] \quad (G.2.3-1)$$

una vez más independientes del material de transferencia.

Y su incertidumbre típica relativa es

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_{\text{aCal1}})(1/\rho_{\text{Cal}})^2 + (\rho_{\text{aCal1}} - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}})/(\rho_{\text{Cal}})^4 + u^2(\rho_{\text{as1}})(1/\rho_c)^2 + u^2(\rho_{\text{as2}})(1/\rho_c)^2 + u^2(\rho_a)(1/\rho_c)^2 \quad (\text{G.2.3-2})$$

Raramente se habrá realizado el ajuste de la seleccionadora en un momento diferente al de la calibración, por lo que, habitualmente, se tendrá que $\rho_{\text{as2}} = \rho_a$, y

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_{\text{aCal1}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal1}} - \rho_{\text{as1}}}{\rho_c} \right] \quad (\text{G.2.3-3})$$

con incertidumbre típica relativa

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_{\text{aCal1}})(1/\rho_{\text{Cal}})^2 + (\rho_{\text{aCal1}} - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}})/(\rho_{\text{Cal}})^4 + u^2(\rho_{\text{as1}})(1/\rho_c)^2 \quad (\text{G.2.3-4})$$

Si la calibración del instrumento de control ha sido aportada por el cliente y en el certificado correspondiente no constan ρ_{aCal1} ni ρ_{Cal} , debería actuarse según 7.2.2, excepto que no es aplicable lo que se indica para el caso de patrones que cumplen con OIML R111. En la mayoría de los casos, la única ecuación disponible para el cálculo de ρ_{aCal1} será la establecida en el Anexo I 1.5 de G-ENAC-13.

Si se tiene constancia de que $\rho_{\text{as1}} = \rho_{\text{aCal1}}$, entonces

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_{\text{aCal1}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] \quad (\text{G.2.3-5})$$

con incertidumbre típica relativa

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_{\text{aCal1}})(1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_c)^2 + (\rho_{\text{aCal1}} - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}})/(\rho_{\text{Cal}})^4 \quad (\text{G.2.3-6})$$

y en este caso es también aplicable lo que se indica en 7.2.2 para el caso de patrones que cumplen con OIML R111.

Para una densidad del aire de $1,1 \text{ kg/m}^3$ y una densidad de las masas de referencia de 7950 kg/m^3 , con incertidumbres $0,03 \text{ kg/m}^3$ y 70 kg/m^3 , respectivamente, la incertidumbre relativa sería del orden de $1,2 \times 10^{-7}$.

En la determinación de la incertidumbre de la masa de transferencia pueden ser relevantes los términos asociados a la variación del ajuste y la variación con la temperatura del instrumento de control. Si no se ha trasladado el instrumento, el término relevante es el asociado al transcurso del tiempo, y si el instrumento se ha trasladado, son relevantes todos los términos indicados en G-ENAC-13, incluyendo la variación de la gravedad.

2.4. Calibraciones del instrumento de control y de la masa de transferencia realizadas previamente y a la vez

Esta situación se dará cuando la calibración del instrumento de control y del material de transferencia se ha realizado en el mismo momento, que es diferente del correspondiente a la calibración de la seleccionadora ponderal. Correspondería, por ejemplo, a una situación en que no se ha trasladado el instrumento de control al lugar de calibración de la seleccionadora ponderal y las masas de transferencia se han determinado en la ubicación del instrumento de control (normalmente, el laboratorio permanente) simultáneamente a la calibración del instrumento de control.

La ecuación de partida es la general, establecida en el apartado 4.4

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_{\text{aCal1}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal1}} - \rho_{\text{as1}}}{\rho_c} + (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal2}} - \rho_{\text{as2}}}{\rho_c} - (\rho_{\text{at}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] \quad (4.4.2-3)$$

Si el instrumento de control ha sido calibrado previamente y el material de transferencia se pesa en el instrumento de control en el mismo momento, $\rho_{\text{as1}} = \rho_{\text{aCal1}} = \rho_{\text{at}} \neq \rho_{\text{as2}} \neq \rho_{\text{aCal2}}$, adoptando solamente para las que son iguales el símbolo ρ_a , $\rho_a = \rho_{\text{as1}} = \rho_{\text{aCal1}} = \rho_{\text{at}}$.

Entonces, los términos de empuje de la ecuación 4.4.2-3 quedan como

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_t} \right) + (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal2}} - \rho_{\text{as2}}}{\rho_c} \right] \quad (G.2.4-1)$$

y ya no se anula la contribución del material de transferencia, como tampoco sucedería en cualquier caso en que $\rho_{\text{aCal2}} \neq \rho_{\text{at}}$.

Su incertidumbre típica relativa es

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_a)(1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_t)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}})/(\rho_{\text{Cal}})^4 + u^2(\rho_{\text{aCal2}})(1/\rho_t)^2 + (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_a)^2 u^2(\rho_t)/(\rho_t)^4 + u^2(\rho_{\text{as2}})(1/\rho_c)^2 \quad (G.2.4-2)$$

Raramente se habrá realizado el ajuste de la seleccionadora en un momento diferente al de la calibración, por lo que, habitualmente, se tendrá que $\rho_{\text{as2}} = \rho_{\text{aCal2}}$, y

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_t} \right) + (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] \quad (G.2.4-3)$$

con incertidumbre típica relativa

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_a)(1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_t)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}})/(\rho_{\text{Cal}})^4 + u^2(\rho_{\text{aCal2}})(1/\rho_t - 1/\rho_c)^2 + (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_a)^2 u^2(\rho_t)/(\rho_t)^4 \quad (G.2.4-4)$$

Para una densidad del aire de $1,1 \text{ kg/m}^3$ y una densidad de las masas de referencia de 7950 kg/m^3 , con incertidumbres $0,03 \text{ kg/m}^3$ y 70 kg/m^3 , respectivamente, y con una densidad de las masas de transferencia de 1500 kg/m^3 , con una incertidumbre de 200 kg/m^3 , la incertidumbre relativa sería del orden de $2,5 \times 10^{-5}$.

Dado que interviene la densidad de las masas de transferencia solamente se recomienda utilizarlo cuando el término y su incertidumbre sean despreciables.

En la determinación de la incertidumbre de la masa de transferencia pueden ser relevantes los términos asociados a su deriva.

2.5. Calibraciones del instrumento de control y de la masa de transferencia realizadas previamente, de forma separada

Esta situación se dará cuando el instrumento de control ha sido calibrado previamente y el material de transferencia se ha pesado en el instrumento de control en otro momento, que también es diferente del correspondiente a la calibración de la seleccionadora ponderal. Correspondería, por ejemplo, a una situación en que no se ha trasladado el instrumento de control al lugar de calibración de la seleccionadora ponderal y las masas de transferencia se han calibrado en el instrumento de control sin hacer comparación con los patrones de masa, por lectura directa, utilizando las correcciones de calibración del instrumento de control.

La ecuación de partida es la general, establecida en el apartado 4.4

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_{as1}}{\rho_c} + (\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_{as2}}{\rho_c} - (\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] \quad (4.4.2-3)$$

Si el instrumento de control ha sido calibrado previamente y el material de transferencia no se pesa en el instrumento de control en ese mismo momento, $\rho_{as1} = \rho_{a\text{Cal1}} \neq \rho_a \neq \rho_{as2} \neq \rho_{a\text{Cal2}}$, adoptando solamente para las que son iguales el símbolo ρ_a , $\rho_a = \rho_{as1} = \rho_{a\text{Cal1}}$.

Entonces, los términos de empuje de la ecuación 4.4.2-3 quedan como

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + (\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_{as2}}{\rho_c} - (\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] \quad (G.2.5-1)$$

Su incertidumbre típica relativa es

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_a) (1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_c)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}}) / (\rho_{\text{Cal}})^4 + u^2(\rho_{a\text{Cal2}}) (1/\rho_t)^2 + u^2(\rho_{as2}) / (\rho_c)^2 + u^2(\rho_{at}) (1/\rho_t - 1/\rho_c)^2 + (\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_{at})^2 u^2(\rho_t) / (\rho_t)^4 \quad (G.2.5-3)$$

Raramente se habrá realizado el ajuste de la seleccionadora en un momento diferente al de la calibración, por lo que, habitualmente, se tendrá que $\rho_{as2} = \rho_{a\text{Cal2}}$, y

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + (\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) - (\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] \quad (G.2.5-2)$$

con incertidumbre típica relativa

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_a)(1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_c)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}})/(\rho_{\text{Cal}})^4 + u^2(\rho_{\text{aCal2}})(1/\rho_t - 1/\rho_c)^2 + u^2(\rho_{\text{at}})(1/\rho_t - 1/\rho_c)^2 + (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_{\text{at}})^2 u^2(\rho_t)/(\rho_t)^4 \quad (\text{G.2.5-3})$$

Para una densidad del aire de $1,1 \text{ kg/m}^3$ y una densidad de las masas de referencia de 7950 kg/m^3 , con incertidumbres $0,03 \text{ kg/m}^3$ y 70 kg/m^3 , respectivamente, y con una densidad de las masas de transferencia de 1500 kg/m^3 , con una incertidumbre de 200 kg/m^3 , la incertidumbre relativa sería del orden de $2,5 \times 10^{-5}$.

En la determinación de la incertidumbre de la masa de transferencia pueden ser relevantes los términos asociados a la variación del ajuste y la variación con la temperatura del instrumento de control y los términos asociados a la deriva de la masa de transferencia.

2.6. Calibración realizada a la vez, con instrumento de control que previamente ha sido verificado

Otro caso, es aquel en que, el pesaje de las masas de transferencia se realiza in situ, y como instrumento de control se utiliza uno que ha sido:

- verificado legalmente en un momento previo, sin que se disponga de las correcciones de calibración, sino que solamente se sabe que la verificación legal ha tenido resultado favorable, o
- ha sido verificado previamente, sin que se disponga de las correcciones de calibración, sino que solamente se sabe que son inferiores a un determinado criterio conocido.

Cuando la masa de transferencia se utiliza en la seleccionadora ponderal, el valor de referencia se determina según 4.3.4-3

$$m_{\text{ref2}} = m_{\text{cTra}} + \delta m_{\text{B2}}$$

y cuando la masa de transferencia se ha colocado en el instrumento de control para determinar su valor se obtiene, ignorando términos de esperanza matemática nula,

$$m_{\text{cTra}} = R - R_0 + m_{\text{N}}(\rho_{\text{at}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \quad (\text{G2.6-1})$$

a partir de la ecuación 7.4-1a de G-ENAC-13, donde los símbolos se utilizan como en G-ENAC-13, con su mismo significado, excepto por el subíndice t , que se refiere a la masa de transferencia o el momento de la transferencia.

Substituyendo este valor en la ecuación precedente se obtiene

$$m_{\text{ref2}} = R_L - R_0 + m_{\text{N}}(\rho_{\text{at}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \delta m_{\text{B2}} \quad (\text{G2.6-2})$$

Centrándonos en los términos asociados al empuje del aire $m_{\text{N}}(\rho_{\text{at}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \delta m_{\text{B2}}$, a partir de la ecuación 4.2.4-5 de G-ENAC-13,

$$\delta m_{Bi} = -m_{cCal} [(\rho_{aCali} - \rho_0)(1/\rho_{Cali} - 1/\rho_c) + (\rho_{aCali} - \rho_{asi})/\rho_c]$$

y con $m_{cCal} = m_N$ y $\rho_{Cal2} = \rho_t$,

pueden escribirse como

$$\delta m_{BTot} = -m_N \left[(\rho_{aCal2} - \rho_{at}) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{aCal2} - \rho_{as2}}{\rho_c} \right] \quad (G2.6-3)$$

y no se anula la contribución del material de transferencia, como tampoco sucedería en cualquier caso en que $\rho_{aCal2} \neq \rho_{at}$.

Su incertidumbre típica relativa es

$$\hat{w}^2(m_{BTot}) = u^2(\rho_{aCal2})(1/\rho_t)^2 + u^2(\rho_{as2})/(\rho_c)^2 + u^2(\rho_{at})(1/\rho_t - 1/\rho_c)^2 + (\rho_{aCal2} - \rho_{at})^2 u^2(\rho_t)/(\rho_t)^4 \quad (G2.6-4)$$

Para una densidad del aire de $1,1 \text{ kg/m}^3$ y una densidad de las masas de referencia de 7950 kg/m^3 , con incertidumbres $0,03 \text{ kg/m}^3$ y 70 kg/m^3 , respectivamente, y con una densidad de las masas de transferencia de 1500 kg/m^3 , con una incertidumbre de 200 kg/m^3 , la incertidumbre relativa sería del orden de $2,2 \times 10^{-5}$.

Dado que interviene la densidad de las masas de transferencia solamente se recomienda utilizarlo cuando el término y su incertidumbre sean despreciables.

Si el pesaje de la masa de transferencia se realiza en el momento de la calibración de la seleccionadora ponderal $\rho_{at} = \rho_{aCal2}$, y

$$\delta m_{BTot} = -m_N \left[\frac{\rho_{aCal2} - \rho_{as2}}{\rho_c} \right] \quad (G2.6-5)$$

anulándose la contribución del material de transferencia, con incertidumbre

$$\hat{w}^2(m_{BTot}) = u^2(\rho_{aCal2})(1/\rho_c)^2 + u^2(\rho_{as2})/(\rho_c)^2 \quad (G2.6-6)$$

Raramente se habrá realizado el ajuste de la seleccionadora en un momento diferente al de la calibración, por lo que, habitualmente, se tendrá que $\rho_{as2} = \rho_{aCal2}$, y

$$\delta m_{BTot} = 0 \quad (G2.6-7)$$

3. MASAS DE TRANSFERENCIA COMPUESTAS POR CARGAS MIXTAS

En ciertos casos, las cargas aplicadas sobre la seleccionadora ponderal estarán formadas por una masa de transferencia hueca, que contiene pesas patrón.

3.1. Todas las calibraciones y ajustes en el mismo momento

En este caso, el pesaje de las masas de transferencia se realiza in situ y el ajuste del instrumento de control se realiza también in situ, como parte del proceso de calibración de la seleccionadora ponderal. Correspondería, por ejemplo, a una situación en que el laboratorio se desplaza con masas de referencia y utiliza un instrumento de control aportado in situ por el cliente, que el laboratorio ajusta y calibra como parte del proceso de calibración de la seleccionadora ponderal y también a una situación en que el laboratorio se desplaza con masas de referencia y con un instrumento de control propio que se ajusta y calibra previamente al uso.

La ecuación de partida es la general, establecida en el apartado 4.4 para cargas mixtas

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \quad (\text{G.3.1-0})$$

$$\left[(\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_{as1}}{\rho_c} + (\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_{as2}}{\rho_c} - (\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right]$$

$$- m'_N \left[(\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_{as2}}{\rho_c} \right]$$

Si los ajustes de los dos instrumentos de pesaje se han realizado en el mismo momento de la calibración puede suponerse que la densidad del aire se ha mantenido constante durante las diferentes operaciones de ajuste y pesaje, $\rho_{a\text{Cal1}} = \rho_{as1} = \rho_{a\text{Cal2}} = \rho_{as2} = \rho_{at}$ y adoptamos para todas ellas el símbolo ρ_a .

Entonces, los términos de empuje quedan como

$$\delta m_{\text{BTot}} = -(m_N + m'_N) \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] \quad (\text{G.3.1-1})$$

como en el caso del apartado 4.4.

con incertidumbre típica relativa

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_a) (1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_c)^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}}) / (\rho_{\text{Cal}})^4 \quad (\text{G.3.1-2})$$

como en el caso del apartado 4.4.

3.2. Calibración de las masas de transferencia, instrumento de control y seleccionadora ponderal realizada a la vez, pero con ajuste del instrumento de control realizado previamente

Un caso, probablemente infrecuente, es aquel en que, si bien el pesaje de las masas de transferencia se realiza in situ, el ajuste del instrumento de control se ha realizado previamente en un momento distinto (y, en general, en un lugar distinto). Correspondería, por ejemplo, a una situación en que el laboratorio se desplaza con masas de referencia y utiliza un instrumento de control aportado in situ por el cliente, que no puede ajustar y también a una situación en que el laboratorio se desplaza con masas de referencia, con un

instrumento de control propio que no se ajusta previamente al uso. El instrumento de control y las masas de transferencia se calibran simultáneamente.

La ecuación de partida es la general, establecida en el apartado 4.4 para cargas mixtas

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \quad (\text{G.3.1-0})$$

$$\left[(\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_{as1}}{\rho_c} + (\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_{as2}}{\rho_c} - (\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right]$$

$$- m'_N \left[(\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_{as2}}{\rho_c} \right]$$

Si los ajustes de los dos instrumentos de pesaje se han realizado en el momentos distintos, la densidad del aire se ha mantenido constante solamente durante las operaciones de pesaje, $\rho_{as1} \neq \rho_{as2} \neq \rho_{a\text{Cal1}} = \rho_{a\text{Cal2}} = \rho_{at}$ y adoptamos solamente para las que son iguales el símbolo ρ_a , $\rho_a = \rho_{a\text{Cal2}} = \rho_{at}$.

Entonces, los términos de empuje quedan como

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} - \frac{1}{\rho_t} + \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_a - \rho_{as1}}{\rho_c} + \frac{\rho_a - \rho_{as2}}{\rho_c} \right] \quad (\text{G.3.2-1})$$

$$- m'_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_a - \rho_{as2}}{\rho_c} \right] =$$

$$= -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{2\rho_a - \rho_{as1} - \rho_{as2}}{\rho_c} \right] - m'_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_a - \rho_{as2}}{\rho_c} \right]$$

que sigue sin estar afectada por el material de transferencia, pero donde intervienen las densidades del aire en el momento del ajuste de los instrumentos.

Y su incertidumbre típica relativa es

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_a) \left[\left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} + \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{m_N}{(m_N + m'_N)} \left(\frac{1}{\rho_c} \right) \right]^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}}) / (\rho_{\text{Cal}})^4 + u^2(\rho_{as1}) \quad (\text{G.3.2-2})$$

$$\left[\frac{m_N}{(m_N + m'_N)} \right]^2 \left(\frac{1}{\rho_c} \right)^2 + u^2(\rho_{as2}) \left(\frac{1}{\rho_c} \right)^2$$

Raramente se habrá realizado el ajuste de la seleccionadora en un momento diferente al de la calibración, por lo que, habitualmente, se tendrá que $\rho_{as2} = \rho_a$

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_a - \rho_{as1}}{\rho_c} \right] - m'_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] \quad (\text{G.3.2-3})$$

con incertidumbre típica relativa

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_a) \left[\left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} + \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{m_N}{(m_N + m'_N)} \left(\frac{1}{\rho_c} \right) \right]^2 + (\rho_a - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}}) / (\rho_{\text{Cal}})^4 + u^2(\rho_{as1}) \quad (\text{G.3.2-4})$$

$$\left[\frac{m_N}{(m_N + m'_N)} \right]^2 \left(\frac{1}{\rho_c} \right)^2$$

3.3. Calibración del instrumento de control realizada previamente

Esta situación se dará cuando el instrumento de control ha sido calibrado y ajustado previamente y la determinación de la masa de transferencia se realiza in situ, durante la calibración de la seccionadora ponderal. Correspondería, por ejemplo, a una situación en que el laboratorio se desplaza sin masas de referencia y utiliza un instrumento de control calibrado aportado in situ por el cliente y también a una situación en que el laboratorio se desplaza sin masas de referencia, con un instrumento de control propio ya calibrado y que no se ajusta previamente al uso. La calibración de las masas de transferencia se realiza por pesada directa y se utilizan las correcciones de calibración del instrumento de control.

La ecuación de partida es la general, establecida en el apartado 4.4 para cargas mixtas

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \quad (\text{G.3.1-0})$$

$$\left[(\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_{as1}}{\rho_c} + (\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_{as2}}{\rho_c} - (\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right]$$

$$- m'_N \left[(\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_{as2}}{\rho_c} \right]$$

Si el instrumento de control ha sido calibrado previamente y el material de transferencia se pesa en el instrumento de control durante la calibración de la seccionadora ponderal, $\rho_{as1} \neq \rho_{as2} \neq \rho_{a\text{Cal1}} \neq \rho_{a\text{Cal2}} = \rho_{at}$, adoptando solamente para las que son iguales el símbolo ρ_a , $\rho_a = \rho_{a\text{Cal2}} = \rho_{at}$.

Entonces, los términos de empuje quedan como

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_{as1} + \rho_a - \rho_{as2}}{\rho_c} \right] \quad (\text{G.3.3-1})$$

$$- m'_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_a - \rho_{as2}}{\rho_c} \right]$$

una vez más independientes del material de transferencia.

Y su incertidumbre típica relativa es

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = (m_N)^2 / (m_N + m'_N)^2 [u^2(\rho_{a\text{Cal1}})(1/\rho_{\text{Cal}})^2 + u^2(\rho_{as1})(1/\rho_c)^2] + u^2(\rho_{as2})(1/\rho_c)^2 \quad (\text{G.3.3-2})$$

$$+ [m_N (1/\rho_c) + m'_N (1/\rho_{\text{Cal}})]^2 / (m_N + m'_N)^2 u^2(\rho_a) + [m'_N (\rho_a - \rho_0) + m_N (\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_0)]^2 / (m_N + m'_N)^2$$

$$u^2(\rho_{\text{Cal}}) / (\rho_{\text{Cal}})^4$$

Raramente se habrá realizado el ajuste de la seccionadora en un momento diferente al de la calibración, por lo que, habitualmente, se tendrá que $\rho_{as2} = \rho_a$, y

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_{as1}}{\rho_c} \right] - m'_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] \quad (\text{G.3.3-3})$$

con incertidumbre típica relativa

$$\hat{W}^2(m_{\text{BTot}}) = (m_N)^2 / (m_N + m'_N)^2 [u^2(\rho_{a\text{Cal1}})(1/\rho_{\text{Cal}})^2 + u^2(\rho_{as1})(1/\rho_c)^2] + (m'_N)^2 / (m_N + m'_N)^2 u^2(\rho_a)(1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_c)^2 + [m'_N(\rho_a - \rho_0) + m_N(\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_0)]^2 / (m_N + m'_N)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}}) / (\rho_{\text{Cal}})^4 \quad (\text{G.3.3-4})$$

En la determinación de la incertidumbre de la masa de referencia pueden ser relevantes los términos asociados a la variación del ajuste y la variación con la temperatura del instrumento de control.

3.4. Calibraciones del instrumento de control y de la masa de transferencia realizadas previamente y a la vez

Esta situación se dará cuando la calibración del instrumento de control y del material de transferencia se ha realizado en el mismo momento, que es diferente del correspondiente a la calibración de la seleccionadora ponderal. Correspondería, por ejemplo, a una situación en que no se ha trasladado el instrumento de control al lugar de calibración de la seleccionadora ponderal y las masas de transferencia se han determinado en la ubicación del instrumento de control (normalmente, el laboratorio permanente) simultáneamente a la calibración del instrumento de control.

La ecuación de partida es la general, establecida en el apartado 4.4 para cargas mixtas

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal1}} - \rho_{as1}}{\rho_c} + (\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_{as2}}{\rho_c} - (\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] - m'_N \left[(\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_{as2}}{\rho_c} \right] \quad (\text{G.3.1-0})$$

Si el instrumento de control ha sido calibrado previamente y el material de transferencia se pesa en el instrumento de control en el mismo momento, $\rho_{as1} = \rho_{a\text{Cal1}} = \rho_{at} \neq \rho_{as2} \neq \rho_{a\text{Cal2}}$, adoptando solamente para las que son iguales el símbolo ρ_a , $\rho_a = \rho_{as1} = \rho_{a\text{Cal1}} = \rho_{at}$.

Entonces, los términos de empuje quedan como

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_t} \right) + (\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_{as2}}{\rho_c} \right] - m'_N \left[(\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{a\text{Cal2}} - \rho_{as2}}{\rho_c} \right] \quad (\text{G.3.4-1})$$

y ya no se anula la contribución del material de transferencia, como tampoco sucedería en cualquier caso en que $\rho_{a\text{Cal2}} \neq \rho_{at}$.

Y su incertidumbre típica relativa es

$$\hat{W}^2(m_{\text{BTot}}) = \frac{(m_N)^2 / (m_N + m'_N)^2 [u^2(\rho_a)(1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_t)^2 + (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_a)^2 u^2(\rho_t)/(\rho_t)^4] + [m_N(\rho_a - \rho_0) + m'_N(\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0)] / (m_N + m'_N)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}})/(\rho_{\text{Cal}})^4 + [m'_N(1/\rho_{\text{Cal}}) + m_N(1/\rho_t)]^2 / (m_N + m'_N)^2 u^2(\rho_{\text{aCal2}}) + [m'_N(1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_c) + (1/\rho_c)^2 u^2(\rho_{\text{as2}})]}{(G.3.4-2)}$$

Raramente se habrá realizado el ajuste de la seleccionadora en un momento diferente al de la calibración, por lo que, habitualmente, se tendrá que $\rho_{\text{as2}} = \rho_{\text{aCal2}}$, y

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_t} \right) + (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] - m'_N \left[(\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] \quad (G.3.4-3)$$

con incertidumbre típica relativa

$$\hat{W}^2(m_{\text{BTot}}) = \frac{(m_N)^2 / (m_N + m'_N)^2 [u^2(\rho_a)(1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_t)^2 + (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_a)^2 u^2(\rho_t)/(\rho_t)^4] + [m_N(\rho_a - \rho_0) + m'_N(\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0)] / (m_N + m'_N)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}})/(\rho_{\text{Cal}})^4 + [m'_N(1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_c) + m_N(1/\rho_t - 1/\rho_c)]^2 / (m_N + m'_N)^2 u^2(\rho_{\text{aCal2}})}{(G.3.4-4)}$$

Dado que interviene la densidad de las masas de transferencia solamente se recomienda utilizarlo cuando el término y su incertidumbre sean despreciables.

En la determinación de la incertidumbre de la masa de referencia pueden ser relevantes los términos asociados a la deriva de la masa de transferencia.

3.5. Calibraciones del instrumento de control y de la masa de transferencia realizadas previamente, de forma separada

Esta situación se dará cuando el instrumento de control ha sido calibrado previamente y el material de transferencia se ha pesado en el instrumento de control en otro momento, que también es diferente del correspondiente a la calibración de la seleccionadora ponderal. Correspondería, por ejemplo, a una situación en que no se ha trasladado el instrumento de control al lugar de calibración de la seleccionadora ponderal y las masas de transferencia se han calibrado en el instrumento de control sin hacer comparación con los patrones de masa, por lectura directa, utilizando las correcciones de calibración del instrumento de control.

La ecuación de partida es la general, establecida en el apartado 4.4 para cargas mixtas

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_{\text{aCal1}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal1}} - \rho_{\text{as1}}}{\rho_c} + (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal2}} - \rho_{\text{as2}}}{\rho_c} - (\rho_{\text{at}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \right] - m'_N \left[(\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal2}} - \rho_{\text{as2}}}{\rho_c} \right] \quad (G.3.1-0)$$

Cuando la masa de transferencia se utiliza en la seleccionadora ponderal, el valor de referencia se determina según 4.3.4-3

$$m_{\text{ref}2} = m_{\text{cTra}} + \delta m_{B2}$$

y cuando la masa de transferencia se ha colocado en el instrumento de control para determinar su valor se obtiene, ignorando términos de esperanza matemática nula,

$$m_{\text{cTra}} = R - R_0 + m_N (\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) \quad (\text{G3.6-1})$$

a partir de la ecuación 7.4-1a de G-ENAC-13, donde los símbolos se utilizan como en G-ENAC-13, con su mismo significado, excepto por el subíndice t, que se refiere a la masa de transferencia o el momento de la transferencia.

Substituyendo este valor en la ecuación precedente se obtiene

$$m_{\text{ref}2} = R_L - R_0 + m_N (\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \delta m_{B2} \quad (\text{G3.6--2})$$

Centrándonos en los términos asociados al empuje del aire $m_N (\rho_{at} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \delta m_{B2}$, a partir de la ecuación 4.2.4-5 de G-ENAC-13,

$$\delta m_{B_i} = -m_{\text{cCal}} [(\rho_{\text{aCal}i} - \rho_0) (1/\rho_{\text{Cal}i} - 1/\rho_c) + (\rho_{\text{aCal}i} - \rho_{\text{as}i})/\rho_c]$$

y con $m_{\text{cCal}} = m_N$ y $\rho_{\text{Cal}2} = \rho_t$,

pueden escribirse como

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_{\text{aCal}2} - \rho_{at}) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal}2} - \rho_{\text{as}2}}{\rho_c} \right] \quad (\text{G3.6--3})$$

y añadiendo las masas patrón para componer la carga mixta

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_N \left[(\rho_{\text{aCal}2} - \rho_{at}) \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal}2} - \rho_{\text{as}2}}{\rho_c} \right] - m'_N \left[(\rho_{\text{aCal}2} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal}2} - \rho_{\text{as}2}}{\rho_c} \right] \quad (\text{G3.6--4})$$

y no se anula la contribución del material de transferencia, como tampoco sucedería en cualquier caso en que $\rho_{\text{aCal}2} \neq \rho_{at}$.

Su incertidumbre típica relativa es

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_{\text{aCal2}}) \left[\left(\frac{m_{\text{N}}}{m_{\text{N}}+m'_{\text{N}}} \left(\frac{1}{\rho_{\text{t}}} \right) + \frac{m'_{\text{N}}}{m_{\text{N}}+m'_{\text{N}}} \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} \right) \right)^2 + u^2(\rho_{\text{as2}})/(\rho_{\text{c}})^2 + u^2(\rho_{\text{at}}) \right. \\ \left. \frac{(m_{\text{N}})^2}{(m_{\text{N}}+m'_{\text{N}})^2} \left(\frac{1}{\rho_{\text{t}}} - \frac{1}{\rho_{\text{c}}} \right)^2 + \frac{(m_{\text{N}})^2}{(m_{\text{N}}+m'_{\text{N}})^2} (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_{\text{at}})^2 u^2(\rho_{\text{t}})/(\rho_{\text{t}})^4 + \frac{(m'_{\text{N}})^2}{(m_{\text{N}}+m'_{\text{N}})^2} (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}})/(\rho_{\text{Cal}})^4 \right] \quad (\text{G3.6--5})$$

Dado que interviene la densidad de las masas de transferencia solamente se recomienda utilizarlo cuando el término y su incertidumbre sean despreciables.

Si el pesaje de la masa de transferencia se realiza en el momento de la calibración de la seccionadora ponderal $\rho_{\text{at}} = \rho_{\text{aCal2}}$, y

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m_{\text{N}} \left[\frac{\rho_{\text{aCal2}} - \rho_{\text{as2}}}{\rho_{\text{c}}} \right] - m'_{\text{N}} \left[(\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_{\text{c}}} \right) + \frac{\rho_{\text{aCal2}} - \rho_{\text{as2}}}{\rho_{\text{c}}} \right] \quad (\text{G3.6--6})$$

anulándose la contribución del material de transferencia, con incertidumbre

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_{\text{aCal2}}) \left[\left(\frac{m_{\text{N}}}{m_{\text{N}}+m'_{\text{N}}} \left(\frac{1}{\rho_{\text{c}}} \right) + \frac{m'_{\text{N}}}{m_{\text{N}}+m'_{\text{N}}} \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} \right) \right)^2 + u^2(\rho_{\text{as2}})/(\rho_{\text{c}})^2 + \right. \\ \left. \frac{(m'_{\text{N}})^2}{(m_{\text{N}}+m'_{\text{N}})^2} (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}})/(\rho_{\text{Cal}})^4 \right] \quad (\text{G3.6--7})$$

Raramente se habrá realizado el ajuste de la seccionadora en un momento diferente al de la calibración, por lo que, habitualmente, se tendrá que $\rho_{\text{as2}} = \rho_{\text{aCal2}}$, y

$$\delta m_{\text{BTot}} = -m'_{\text{N}} \left[(\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_{\text{c}}} \right) \right] \quad (\text{G3.6--8})$$

con incertidumbre

$$\hat{w}^2(m_{\text{BTot}}) = u^2(\rho_{\text{aCal2}}) \left[\left(\frac{m'_{\text{N}}}{m_{\text{N}}+m'_{\text{N}}} \left(\frac{1}{\rho_{\text{Cal}}} - \frac{1}{\rho_{\text{c}}} \right) \right)^2 + \frac{(m'_{\text{N}})^2}{(m_{\text{N}}+m'_{\text{N}})^2} (\rho_{\text{aCal2}} - \rho_0)^2 u^2(\rho_{\text{Cal}})/(\rho_{\text{Cal}})^4 \right] \quad (\text{G3.6--9})$$

EJEMPLOS

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. | EJEMPLO 1 | 1 |
| 2.1 | Datos generales de la calibración | 1 |
| 2.2 | Calibración de la masa de transferencia | 2 |
| 2.3 | Ensayos en funcionamiento automático | 3 |
| 2.3.1 | Prueba de error y repetibilidad | 3 |
| 2.3.2 | Prueba de excentricidad | 3 |
| 2.4 | Incertidumbre de medida | 3 |
| 2.4.1 | Fórmulas empleadas para determinación de la incertidumbre | 4 |
| 2.4.2 | Incertidumbre expandida en la calibración | 4 |
| 2.4.3 | Incertidumbre expandida de un resultado de pesada | 5 |
| 3. | EJEMPLO 2 | 6 |
| 3.1 | Datos generales de la calibración | 6 |
| 3.2 | Calibración en estático de la seleccionadora ponderal | 6 |
| 3.3 | Calibración de las masas de transferencia. | 6 |
| 3.4 | Ensayos en funcionamiento automático | 7 |
| 3.4.1 | Prueba de error y repetibilidad | 7 |
| 3.4.2 | Prueba de excentricidad dinámica | 8 |
| 3.5 | Incertidumbre de medida | 9 |
| 3.5.1 | Fórmulas empleadas para la determinación de la incertidumbre | 9 |
| 3.5.2 | Incertidumbre expandida en la calibración, masa de transferencia A | 9 |
| 3.5.3 | Incertidumbre expandida de un resultado de pesada, masa de transferencia A | 10 |
| 3.5.4 | Incertidumbre expandida en la calibración, masa de transferencia B | 11 |
| 3.5.5 | Incertidumbre expandida de un resultado de pesada, masa de transferencia B | 12 |

1. INTRODUCCIÓN

Los ejemplos presentados en este anexo muestran, de diferentes maneras, cómo pueden aplicarse correctamente las reglas contenidas en esta guía. Los ejemplos no tienen la intención de indicar ninguna preferencia de ciertos procedimientos sobre otros para los que no se dan ejemplos.

Para referencias a las secciones relevantes de la guía ver Anexo IV apartado 2.

2. EJEMPLO 1

2.1 Datos generales de la calibración

Para este ejemplo se considera la calibración de una seleccionadora, que a indicación del cliente se realiza con una sola masa de transferencia y una sola velocidad correspondientes a las de su proceso. En este supuesto, la seleccionadora no dispone de indicación en estático, y se utiliza otra balanza como instrumento de control. Este instrumento de control tiene mejor resolución que la seleccionadora. La seleccionadora dispone de guías para el centrado del artículo que pesa, por lo que en este caso no procede la prueba de excentricidad en dinámico. Toda la calibración se lleva a cabo en el lugar de instalación del instrumento.

Las características de la seleccionadora y de la calibración se indican en la siguiente tabla.

Características de la seleccionadora y de la calibración

| Magnitud | Símbolo | Valor |
|---|-----------------------|-------------------|
| Alcance máximo | Max | 300 g |
| Resolución | d | 0,1 g |
| Resolución instrumento de control | d_{IC} | 0,01 g |
| Dimensiones del plato de pesada | $L \times W$ | 22 cm x 12 cm |
| Valor nominal de la masa de transferencia | | 46 g |
| Dimensiones de la masa de transferencia* | $L \times W \times H$ | (40 x 95 x 40) mm |
| Velocidad de proceso | v | 40 m/min |
| Cadencia máxima | | 200 piezas/min |
| Temperatura durante las pruebas | | 21,7 °C |
| Patrones de masa | | Clase M1 |
| *Largo medido en el sentido de transporte | | |

2.2 Calibración de la masa de transferencia

Se determina el valor de la masa de transferencia utilizando una balanza como instrumento de control. La balanza tiene mejor resolución que la seleccionadora. Utilizamos como patrón pesas de clase M1 de valor nominal próximo al de la masa de transferencia, aplicando un ciclo de pesadas *abba*. Adicionalmente, es necesario realizar una prueba de repetibilidad conforme a G-ENAC-13 para obtener la desviación típica del instrumento de control. Como la calibración de la seleccionadora y de la masa de transferencia se realizan en la misma actuación las contribuciones por empuje del aire se anulan. Como se permitió un tiempo de aclimatación suficiente para las pesas y para la masa de transferencia, el efecto de la convección resulta despreciable.

Lecturas de comparación de la masa de transferencia con las pesas patrón

| a1 | b1 | b2 | a2 |
|---|-----------------------|-----------------------|--------------|
| Pesas patrón | Masa de transferencia | Masa de transferencia | Pesas patrón |
| 45,01 g | 46,62 g | 46,62 g | 45,01 g |
| Diferencia de indicación, $\Delta I = (b1-a1-a2+b2) / 2 = 1,61$ g | | | |

Calibración en estático de la masa de transferencia

| Magnitud | Símbolo | Fórmula | Valor |
|---------------------------------------|------------|---------------------------------------|---------|
| Valor nominal de los patrones de masa | m_N | | 45 g |
| Diferencia de indicación | ΔI | $\Delta I = (b1-a1-a2+b2) / 2$ | 1,61 g |
| Masa de transferencia | M_{Tra} | $M_{Tra} = m_N + \Delta I$ | 46,61 g |
| Masa de referencia | M_{ref} | $M_{ref} = M_{Tra} + \delta m_{BTot}$ | 46,61 g |

Prueba de repetibilidad en el instrumento de control

| Repetición | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Lectura (g) | 46,62 | 46,62 | 46,62 | 46,62 | 46,63 | 46,62 |
| Desviación típica: $s_{IC} = 0,00408$ g | | | | | | |

2.3 Ensayos en funcionamiento automático

2.3.1 Prueba de error y repetibilidad

Como el valor de la masa de transferencia no es superior a 10 kg se realizan 30 pasadas con la masa de transferencia, obteniéndose la media y la desviación típica de estas 30 lecturas, y también el error de la seleccionadora. La prueba se realiza a la velocidad de proceso normalmente empleada en el uso del instrumento.

Prueba de error y repetibilidad

| Valores | | | |
|---------|-------------|--------|-------------|
| Pasada | Lectura (g) | Pasada | Lectura (g) |
| 1 | 47,1 | 16 | 47,2 |
| 2 | 46,9 | 17 | 47,1 |
| 3 | 46,9 | 18 | 46,9 |
| 4 | 46,8 | 19 | 46,9 |
| 5 | 47,0 | 20 | 46,9 |
| 6 | 46,9 | 21 | 47,1 |
| 7 | 47,0 | 22 | 47,0 |
| 8 | 46,9 | 23 | 46,9 |
| 9 | 47,0 | 24 | 46,8 |
| 10 | 47,0 | 25 | 46,9 |
| 11 | 46,9 | 26 | 46,9 |
| 12 | 47,2 | 27 | 46,9 |
| 13 | 46,9 | 28 | 47,0 |
| 14 | 46,9 | 29 | 46,9 |
| 15 | 47,0 | 30 | 46,8 |

| Resultados | | | |
|---------------------------|-----------|--|---------|
| Magnitud | Símbolo | Fórmula | Valor |
| Desviación típica | s | $s(I_j) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{ji} - \bar{I}_j)^2}$ | 0,104 g |
| Media de las indicaciones | \bar{I} | $\bar{I}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{ji}$ | 46,95 g |
| Número de pasadas | n | | 30 |
| Masa de referencia | M_{ref} | $M_{ref} = M_{Tra} + \delta m_{BTot} = m_N + \Delta l + \delta m_{BTot}$ | 46,61 g |
| Error | E | $E = I - M_{ref}$ | 0,34 g |

2.3.2 Prueba de excentricidad

La seleccionadora dispone de guías que se adaptan al ancho del producto, por lo que no procede realizar la prueba de excentricidad dinámica.

2.4 Incertidumbre de medida

Las fórmulas básicas necesarias para la determinación de la incertidumbre, la incertidumbre expandida en la calibración y la incertidumbre expandida de un resultado de pesada se incluyen a continuación.

2.4.1 Fórmulas empleadas para determinación de la incertidumbre

| Magnitud | Fórmula | Ecuación |
|--|---|----------|
| Error. Ecuación básica de la calibración | $E = I - m_{ref} = I - m'_{ref} + \Delta I_{IC}$ | 7.1-1 |
| Varianza del error | $u^2(E) = u^2(I) + u^2(m'_{ref}) + u^2(\Delta I_{IC})$ | 7.1-2 |
| Indicación en la seleccionadora ponderal | $I = I_L + \sum I_{digL} + \sum I_{rep} + \sum I_{ecc} - I_0 - \sum I_{dig0}$ | 7.1.1-1 |
| Varianza de la indicación en la seleccionadora | $u^2(I) = d_0^2/12 + d_i^2/12 + s^2(I)/n + \hat{w}^2(I_{ecc})/n^2$ | 7.1.1-7 |
| Valor de referencia de la masa | $m'_{ref} = m_N + \sum m_c + \sum m_D + \sum m_{conv2} + \sum m_{conv1} + \sum m_{BTot} + \sum m_{...}$ | 7.1.2-1 |
| Varianza de la masa de referencia | $u^2(m'_{ref}) = u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_{BTot}) + u^2(\delta m_D) + u^2(\delta m_{conv})$ | 7.1.2-9a |
| Desviación en el instrumento de control | $\Delta I_{IC} = (I_{L1} - I_{01} - R_L + R_0) - \sum R_{digL} + \sum R_{dig0} + \sum I_{digL1} - \sum I_{dig0} + \sum I_{rep1} + \sum I_{ecc1} + \sum R_{rep} + \sum R_{ecc1} + \sum R_{instr} + \sum R_{proc}$ | 7.1.3-1 |
| Varianza de la desviación en instrumento de control | $u^2(\Delta I_{IC}) = u^2(I_{L1} - I_{01} - R_L + R_0) - u^2(\sum R_{digL}) + u^2(\sum R_{dig0}) + u^2(\sum I_{digL1}) + u^2(\sum I_{dig0}) + u^2(\sum I_{rep1}) + u^2(\sum I_{ecc1}) + u^2(\sum R_{rep}) + u^2(\sum R_{ecc}) + u^2(\sum R_{instr}) + u^2(\sum R_{proc})$ | 7.1.3-2 |
| Resultado de las pesadas (artículo calibrado) | $W = R - E(R) \pm U(E)$ | 7.3-2 |
| Varianza del resultado (si se pudiera corregir el error) | $u^2(W) = u^2(R) + u^2(E)$ | 7.3-3 |
| Lectura en las condiciones de uso | $R = R_L - R_0 + \delta R_{digL} - \delta R_{dig0} + \delta R_{rep} + \delta R_{ecc} + \delta R_{instr} + \delta R_{proc} \dots$ | 7.3.1-1 |
| Varianza de la lectura en condiciones de uso | $u^2(R) = d_i^2/12 + d_0^2/12 + s^2(R) + R^2/ \Delta I_{ecc} _{max}^2/(12L_{ecc}^2) + \dots$ | 7.3.1-6 |
| Incertidumbre expandida de un resultado de pesada | $U_{gl}(W_i) = 2\sqrt{u^2(R_i) + u^2(E_i)} + E_i $ | 7.3.3-2 |

2.4.2 Incertidumbre expandida en la calibración

| Contribución | Simb | Distribución de probabilidad | u_i | | u_i^2 (g ²) |
|---|--------------|----------------------------------|-----------------|-----------|------------------------------|
| | | | Fórmula | valor (g) | |
| Contribuciones debidas a la indicación del instrumento | | | | | |
| Resolución a carga nula | d_0 | Rectangular Amplitud 0,1 g | $d_0/\sqrt{12}$ | 0,02887 | 0,0008333 |
| Resolución con carga | d | Rectangular Amplitud 0,1 g | $d/\sqrt{12}$ | 0,02887 | 0,0008333 |
| Repetibilidad | s | Normal Desv. típica 0,1042 g | s/\sqrt{n} | 0,01902 | 0,0003617 |
| Excentricidad dinámica | No aplica | | | | |
| Contribuciones debidas al patrón de masa (45 g clase M1) | | | | | |
| Tolerancia del patrón de masa | Tol | Rectangular Amplitud 0,0066 g | $Tol/\sqrt{3}$ | 0,003811 | 0,00001452 |
| Deriva del patrón | D | Rectangular Amplitud 0,0033 g | $D/\sqrt{3}$ | 0,001905 | 0,00000363 |
| Empuje del aire | Despreciable | | | | |
| Convección | Despreciable | | | | |

| Contribuciones debidas al instrumento de control | | | | | |
|--|--------------|----------------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| Resolución IC a carga nula, pesas | d_{IC0} | Rectangular Amplitud 0,01 g | $d_{IC0}/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ |
| Resolución IC con carga, pesas | d_{IC} | Rectangular Amplitud 0,01 g | $d_{IC}/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ |
| Resolución IC a carga nula, M_{tra} | dR_{IC0} | Rectangular Amplitud 0,01 g | $dR_{IC0}/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ |
| Resolución IC con carga, M_{tra} | dR_{IC} | Rectangular Amplitud 0,01 g | $dR_{IC}/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ |
| Repetibilidad IC | s_{IC} | Normal Desv. típica 0,00408 g | s_{IC} | 0,00408 | $1,664 \cdot 10^{-5}$ |
| Otras* | Despreciable | | | | |
| | | | | Σ Varianzas | 0,002096 |
| Incertidumbre típica del error, $u(E) =$ | | | | | 0,0458 g |
| Factor de cobertura $k =$ | | | | | 2 |
| Incertidumbre expandida en la calibración, $U(E) = 0,091$ g | | | | | |
| * Otras contribuciones se consideran despreciables porque se ha utilizado el instrumento de control para un ciclo <i>abba</i> y porque el valor de las pesas y de la masa de transferencia son suficientemente próximos. | | | | | |

2.4.3 Incertidumbre expandida de un resultado de pesada

| Contribución | Simb | Distribución de probabilidad | u_i | | u_i^2 (g ²) |
|--|-----------|---------------------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|
| | | | Fórmula | valor (g) | |
| Contribuciones debidas a la indicación del instrumento en condiciones de uso | | | | | |
| Resolución a carga nula | d_0 | Rectangular Amplitud 0,1 g | $d_0/\sqrt{12}$ | 0,02887 | 0,0008333 |
| Resolución con carga | d | Rectangular Amplitud 0,1 g | $d/\sqrt{12}$ | 0,02887 | 0,0008333 |
| Repetibilidad | s | Normal Desv. típica 0,1042 g | s | 0,1042 | 0,01085 |
| Excentricidad dinámica | No aplica | | | | |
| | | | | Σ Varianzas | 0,01251 |
| Incertidumbre de la lectura en condiciones de uso, $u(R) =$ | | | | | 0,1119 g |
| Incertidumbre típica del error, $u(E) =$ | | | | | 0,0458 g |
| Error, $E_{Mtra} =$ | | | | | 0,3433 g |
| $U_{g_i}(W_i) = 2\sqrt{u^2(R_i) + u^2(E_i)} + E_i $ | | | | | |
| Incertidumbre expandida de un resultado de pesada, $U_{g_i}(M_{tra}) = 0,59$ g | | | | | |

3. EJEMPLO 2

3.1 Datos generales de la calibración

Para este ejemplo se considera la calibración de una seleccionadora, realizada con dos masas de transferencia a la misma velocidad, correspondientes a dos procesos distintos del cliente. La seleccionadora no dispone de guías para el centrado de los artículos que pesa, que en general son de variadas dimensiones. En este caso la prueba de excentricidad en dinámico se realiza con la segunda masa de transferencia, la más pesada y compatible con esta prueba. Como instrumento de control se utilizará la propia seleccionadora. Toda la calibración se lleva a cabo en el lugar de instalación del instrumento y en la misma actuación.

Las características de la seleccionadora y de la calibración se indican en la siguiente tabla.

| Magnitud | Símbolo | Valor |
|--|-----------------------|-------------------|
| Alcance máximo | <i>Max</i> | 20 kg |
| Resolución | <i>d</i> | 0,01 kg |
| Resolución instrumento de control | <i>d_{IC}</i> | 0,01 kg |
| Dimensiones del plato de pesada | <i>L x W</i> | 100 cm x 60 cm |
| Valor nominal de la masa de transferencia <i>A</i> | | 5,11 kg |
| Dimensiones de la masa de transferencia <i>A</i> * | <i>L x W x H</i> | (40 x 25 x 15) cm |
| Valor nominal de la masa de transferencia <i>B</i> | | 14,54 kg |
| Dimensiones de la masa de transferencia <i>B</i> * | <i>L x W x H</i> | (70 x 35 x 25) cm |
| Velocidad de proceso | <i>v</i> | 40 m/min |
| Cadencia máxima | | 25 piezas/min |
| Temperatura durante las pruebas | | 18,6 °C |
| Patrones de masa | | Clase M1 |
| *Largo medido en el sentido de transporte | | |

3.2 Calibración en estático de la seleccionadora ponderal

Se realiza una calibración en estático de la seleccionadora conforme a G-ENAC-13, que incluye una prueba de repetibilidad de 6 repeticiones realizadas con una masa de 10 kg, obteniéndose la desviación típica en estático de la seleccionadora. En este caso se obtuvieron 6 lecturas iguales por lo que resulta $s_{IC} = 0,00$ kg. Esta desviación típica se necesitará posteriormente para el cálculo de la incertidumbre típica del patrón de masa.

3.3 Calibración de las masas de transferencia.

Se determina el valor de las masas de transferencia en la misma actuación que se calibra la seleccionadora y utilizando ésta misma como instrumento de control. Utilizamos como patrón pesas de clase M1 de valor nominal próximo al de cada masa de transferencia, aplicando para cada una de ellas un ciclo de pesadas *abba*. Como se permitió un tiempo de aclimatación suficiente el efecto de la convección resulta despreciable. Como la calibración de la seleccionadora y de las masas de transferencia se realizan en la misma actuación las contribuciones por empuje del aire se anulan.

Lecturas de comparación de la masa de transferencia *A* con las pesas patrón

| a1 | b1 | b2 | a2 |
|--|-----------------------|-----------------------|--------------|
| Pesas patrón | Masa de transferencia | Masa de transferencia | Pesas patrón |
| 5,10 kg | 5,11 kg | 5,11 kg | 5,10 kg |
| Diferencia de indicación, $\Delta I = (b1 - a1 - a2 + b2) / 2 = 0,01$ kg | | | |

Calibración de la masa de transferencia A

| Magnitud | Símbolo | Fórmula | Valor |
|---------------------------------------|------------|---------------------------------------|---------|
| Valor nominal de los patrones de masa | m_N | | 5,1 kg |
| Diferencia de indicación | ΔI | $\Delta I = (b1-a1-a2+b2) / 2$ | 0,01 kg |
| Masa de transferencia A | M_{TraA} | $M_{Tra} = m_N + \Delta I$ | 5,11 kg |
| Masa de referencia A | M_{refA} | $M_{ref} = M_{Tra} + \delta m_{BTot}$ | 5,11 kg |

Lecturas de comparación de la masa de transferencia B con las pesas patrón

| a1 | b1 | b2 | a2 |
|--|-----------------------|-----------------------|--------------|
| Pesas patrón | Masa de transferencia | Masa de transferencia | Pesas patrón |
| 14,50 kg | 14,54 kg | 14,54 kg | 14,50 kg |
| Diferencia de indicación, $\Delta I = (b1-a1-a2+b2) / 2 = 0,04$ kg | | | |

Calibración de la masa de transferencia B

| Magnitud | Símbolo | Fórmula | Valor |
|---------------------------------------|------------|---------------------------------------|----------|
| Valor nominal de los patrones de masa | m_N | | 14,50 kg |
| Diferencia de indicación | ΔI | $\Delta I = (b1-a1-a2+b2) / 2$ | 0,04 kg |
| Masa de transferencia B | M_{TraB} | $M_{Tra} = m_N + \Delta I$ | 14,54 kg |
| Masa de referencia B | M_{refB} | $M_{ref} = M_{Tra} + \delta m_{BTot}$ | 14,54 kg |

3.4 Ensayos en funcionamiento automático

3.4.1 Prueba de error y repetibilidad

Como el valor de la masa de transferencia A no es superior a 10 kg se realizan 30 pasadas con la masa de transferencia A, obteniéndose la media y la desviación típica de estas 30 lecturas, y también el error de la seleccionadora. La prueba se realiza a la velocidad de proceso normalmente empleada en el uso del instrumento.

De manera análoga se determina el error y la desviación típica de las pasadas con la masa de transferencia B. En este caso se realizan 20 pasadas porque su peso está comprendido entre 10 kg y 20 kg.

Las lecturas y resultados se presentan en las tablas que siguen.

Prueba de error y repetibilidad con masa de transferencia A

| Valores | | | |
|---------|--------------|--------|--------------|
| Pasada | Lectura (kg) | Pasada | Lectura (kg) |
| 1 | 5,10 | 16 | 5,10 |
| 2 | 5,12 | 17 | 5,11 |
| 3 | 5,11 | 18 | 5,10 |
| 4 | 5,11 | 19 | 5,10 |
| 5 | 5,10 | 20 | 5,11 |
| 6 | 5,09 | 21 | 5,10 |
| 7 | 5,09 | 22 | 5,11 |
| 8 | 5,10 | 23 | 5,11 |
| 9 | 5,11 | 24 | 5,10 |
| 10 | 5,11 | 25 | 5,10 |
| 11 | 5,11 | 26 | 5,10 |

| 12 | 5,11 | 27 | 5,11 |
|---------------------------|------------|--|------------|
| 13 | 5,11 | 28 | 5,11 |
| 14 | 5,11 | 29 | 5,12 |
| 15 | 5,12 | 30 | 5,13 |
| Resultados | | | |
| Magnitud | Símbolo | Fórmula | Valor |
| Desviación típica | s_A | $s(I_j) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{ji} - \bar{I}_j)^2}$ | 0,00877 kg |
| Media de las indicaciones | I_A | $\bar{I}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{ji}$ | 5,107 kg |
| Número de pasadas | n_A | | 30 |
| Masa de referencia A | M_{refA} | $M_{ref} = M_{Tra} + \delta m_{BTot} = m_N + \Delta l + \delta m_{BTot}$ | 5,11 kg |
| Error | E_A | $E_A = I_A - M_{refA}$ | -0,003 kg |

Prueba de error y repetibilidad con masa de transferencia B

| Valores | | | |
|---------------------------|--------------|--|--------------|
| Pasada | Lectura (kg) | Pasada | Lectura (kg) |
| 1 | 14,53 | 11 | 14,52 |
| 2 | 14,54 | 12 | 14,52 |
| 3 | 14,53 | 13 | 14,54 |
| 4 | 14,54 | 14 | 14,52 |
| 5 | 14,53 | 15 | 14,53 |
| 6 | 14,52 | 16 | 14,52 |
| 7 | 14,53 | 17 | 14,53 |
| 8 | 14,52 | 18 | 14,51 |
| 9 | 14,53 | 19 | 14,52 |
| 10 | 14,54 | 20 | 14,53 |
| Resultados | | | |
| Magnitud | Símbolo | Fórmula | Valor |
| Desviación típica | s_B | $s(I_j) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{ji} - \bar{I}_j)^2}$ | 0,00851 kg |
| Media de las indicaciones | I_B | $\bar{I}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{ji}$ | 14,5275 kg |
| Número de pasadas | n_B | | 20 |
| Masa de referencia B | M_{refB} | $M_{ref} = M_{Tra} + \delta m_{BTot} = m_N + \Delta l + \delta m_{BTot}$ | 14,54 kg |
| Error | E_B | $E_B = I_B - M_{refB}$ | -0,0125 kg |

3.4.2 Prueba de excentricidad dinámica

Esta prueba se realiza con la masa de transferencia B dado que es la de mayor peso y permite el paso por distintas bandas del transportador dado que el ancho del transportador es 60 cm y el ancho de la masa de transferencia es 35 cm. Como su peso está comprendido entre 10 kg y 20 kg se realizan 6 pasadas por cada banda.

Los resultados se muestran en la tabla que sigue.



Prueba de excentricidad dinámica realizada con la masa de transferencia B

| Valores | | | |
|--|--------------|---|--------------|
| Pasada banda 1 | Lectura (kg) | Pasada banda 2 | Lectura (kg) |
| 1 | 14,53 | 1 | 14,54 |
| 2 | 14,52 | 2 | 14,52 |
| 3 | 14,53 | 3 | 14,54 |
| 4 | 14,54 | 4 | 14,54 |
| 5 | 14,52 | 5 | 14,55 |
| 6 | 14,52 | 6 | 14,53 |
| Resultados | | | |
| Promedio banda 1, $I_{banda1} = 14,5267$ kg | | Promedio banda 2, $I_{banda2} = 14,5367$ kg | |
| Promedio pasadas por el centro, $I_{ecc} = I_B = 14,5275$ kg | | | |
| $\Delta I_{ecc\ banda\ 1} = -0,0008$ kg | | $\Delta I_{ecc\ banda\ 2} = 0,0092$ kg | |
| $ (\Delta I_{ecc}) _{Max} = 0,0092$ kg | | | |
| $ (\Delta I_{ecc}) _{Max} / I_{ecc} = 0,00063$ kg/kg | | | |

3.5 Incertidumbre de medida

3.5.1 Fórmulas empleadas para la determinación de la incertidumbre

Ver tabla del apartado 2.4.1.

3.5.2 Incertidumbre expandida en la calibración, masa de transferencia A

| Contribución | Simb | Distribución de probabilidad | u_i | | u_i^2 (kg ²) |
|---|------------------|--------------------------------------|--|----------------------|-------------------------------|
| | | | Fórmula | valor (kg) | |
| Contribuciones debidas a la indicación del instrumento | | | | | |
| Resolución a carga nula | d_0 | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $d_0/\sqrt{12}$ | 0,002887 | 8,333E-06 |
| Resolución con carga | d | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $d/\sqrt{12}$ | 0,002887 | 8,333E-06 |
| Repetibilidad | s_A | Normal Desv. típica 0,0088 | $s_A/\sqrt{n_A}$ | 0,001601 | 2,563E-06 |
| Excentricidad dinámica | ΔI_{ecc} | Rectangular Amplitud 0,0032 kg | $I_A / \Delta I_{ecc} _{Max} / (I_{ecc} \sqrt{12})$ | 0,00093 | 8,653E-07 |
| Contribuciones debidas al patrón de masa (5,1 kg clase M1) | | | | | |
| Tolerancia del patrón de masa | Tol | Rectangular Amplitud 0,000255 kg | $Tol/\sqrt{3}$ | 0,000147 | $2,168 \cdot 10^{-8}$ |
| Deriva del patrón | D | Rectangular Amplitud 0,0001275 kg | $D/\sqrt{3}$ | $7,36 \cdot 10^{-5}$ | $5,419 \cdot 10^{-9}$ |
| Empuje del aire | Despreciable | | | | |
| Convección | Despreciable | | | | |

| Contribuciones debidas al instrumento de control | | | | | |
|--|--------------|---------------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| Resolución IC a carga nula, pesas | d_{IC0} | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $d_{IC0}/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ |
| Resolución IC con carga, pesas | d_{IC} | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $d_{IC}/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ |
| Resolución IC a carga nula, M_{traA} | dR_{IC0} | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $dR_{IC0}/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ |
| Resolución IC con carga, M_{traA} | dR_{IC} | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $dR_{IC}/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ |
| Repetibilidad IC | s_{IC} | Normal Desv. típica 0,00 kg | s_{IC} | 0 | 0 |
| Otras* | Despreciable | | | | |
| | | | | Σ Varianzas | $5,346 \cdot 10^{-5}$ |
| Incertidumbre típica del error, $u(E) =$ | | | | 0,00731 kg | |
| Factor de cobertura $k =$ | | | | 2 | |
| Incertidumbre expandida en la calibración, $U(E_{MtraA}) = 0,015$ kg | | | | | |
| * Otras contribuciones se consideran despreciables porque se ha utilizado el instrumento de control para un ciclo <i>abba</i> y porque el valor de las pesas y de la masa de transferencia son suficientemente próximos. | | | | | |

3.5.3 Incertidumbre expandida de un resultado de pesada, masa de transferencia A

| Contribución | Simb | Distribución de probabilidad | u_i | | u_i^2 (kg ²) |
|---|------------------|-----------------------------------|---|--------------------|-------------------------------|
| | | | Fórmula | valor (kg) | |
| Contribuciones debidas a la indicación del instrumento en condiciones de uso | | | | | |
| Resolución a carga nula | d_0 | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $d_0/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ |
| Resolución con carga | d | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $d/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ |
| Repetibilidad | s_A | Normal Desv. típica 0,0088 | s_A | 0,0088 | $7,69 \cdot 10^{-5}$ |
| Excentricidad dinámica | Δl_{ecc} | Rectangular Amplitud 0,0032 kg | $l_A / \Delta l_{ecc} / \text{Max} / (l_{ecc} \sqrt{12})$ | 0,00093 | $8,653 \cdot 10^{-7}$ |
| | | | | Σ Varianzas | $9,443 \cdot 10^{-5}$ |
| Incertidumbre de la lectura en condiciones de uso, $u(R) =$ | | | | 0,00972 kg | |
| Incertidumbre típica del error, $u(E) =$ | | | | 0,00731 kg | |
| Error, $E_{MtraA} =$ | | | | -0,0030 kg | |
| $U_{gl}(W_i) = 2\sqrt{u^2(R_i) + u^2(E_i)} + E_i $ | | | | | |
| Incertidumbre expandida de un resultado de pesada, $U_{gl}(MtraA) = 0,027$ kg | | | | | |

3.5.4 Incertidumbre expandida en la calibración, masa de transferencia B

| Contribución | Simb | Distribución de probabilidad | u_i | | u_i^2 | |
|--|------------------|--------------------------------------|---|------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | Fórmula | valor (kg) | (kg ²) | |
| Contribuciones debidas a la indicación del instrumento | | | | | | |
| Resolución a carga nula | d_0 | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $d_0/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ | |
| Resolución con carga | d | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $d/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ | |
| Repetibilidad | s_B | Normal Desv. típica 0,0085 kg | $s_B/\sqrt{n_B}$ | 0,001902 | $3,618 \cdot 10^{-6}$ | |
| Excentricidad dinámica | Δl_{ecc} | Rectangular Amplitud 0,0092 kg | $l_B / \Delta l_{ecc} / \text{Max} / (l_{ecc} \sqrt{12})$ | 0,002646 | $7,002 \cdot 10^{-6}$ | |
| Contribuciones debidas al patrón de masa (14,5 kg clase M1) | | | | | | |
| Tolerancia del patrón de masa | Tol | Rectangular Amplitud 0,000725 kg | $Tol/\sqrt{3}$ | 0,000419 | $1,752 \cdot 10^{-7}$ | |
| Deriva del patrón | D | Rectangular Amplitud 0,0003625 kg | $D/\sqrt{3}$ | 0,000209 | $4,38 \cdot 10^{-8}$ | |
| Empuje del aire | Despreciable | | | | | |
| Convección | Despreciable | | | | | |
| Contribuciones debidas al instrumento de control | | | | | | |
| Resolución IC a carga nula, pesas | $d_{l_{co}}$ | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $d_{l_{co}}/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ | |
| Resolución IC con carga, pesas | d_{l_c} | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $d_{l_c}/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ | |
| Resolución IC a carga nula, M_{traB} | $dR_{l_{co}}$ | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $dR_{l_{co}}/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ | |
| Resolución IC con carga, M_{traB} | dR_{l_c} | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $dR_{l_c}/2\sqrt{3}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ | |
| Repetibilidad IC | s_{ic} | Normal Desv. típica 0,00 kg | s_{ic} | 0 | 0 | |
| Otras* | Despreciable | | | | | |
| | | | | | Σ Varianzas | $6,084 \cdot 10^{-5}$ |
| Incertidumbre típica del error, $u(E) = 0,00780$ kg | | | | | | |
| Factor de cobertura $k = 2$ | | | | | | |
| Incertidumbre expandida en la calibración, $U(E_{MtraB}) = 0,016$ kg | | | | | | |
| * Otras contribuciones se consideran despreciables porque se ha utilizado el instrumento de control para un ciclo <i>abba</i> y porque el valor de las pesas y de la masa de transferencia son suficientemente próximos. | | | | | | |

3.5.5 Incertidumbre expandida de un resultado de pesada, masa de transferencia B

| Contribución | Simb | Distribución de probabilidad | u_i | | u_i^2 (kg ²) |
|---|------------------|-----------------------------------|---|--------------------|-------------------------------|
| | | | Fórmula | valor (kg) | |
| Contribuciones debidas a la indicación del instrumento en condiciones de uso | | | | | |
| Resolución a carga nula | d_0 | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $d_0/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ |
| Resolución con carga | d | Rectangular Amplitud 0,01 kg | $d/\sqrt{12}$ | 0,002887 | $8,333 \cdot 10^{-6}$ |
| Repetibilidad | s_B | Normal Desv. típica 0,0085 kg | s_B | 0,0085 | $7,237 \cdot 10^{-5}$ |
| Excentricidad dinámica | Δl_{ecc} | Rectangular Amplitud 0,0092 kg | $l_B / \Delta l_{ecc} / \text{Max} / (l_{ecc} \sqrt{12})$ | 0,002646 | $7,002 \cdot 10^{-6}$ |
| | | | | Σ Varianzas | $9,604 \cdot 10^{-5}$ |
| Incertidumbre de la lectura en condiciones de uso, $u(R) = 0,00980$ kg | | | | | |
| Incertidumbre típica del error, $u(E) = 0,00780$ kg | | | | | |
| Error, $E_{MtraB} = -0,0125$ kg | | | | | |
| $U_{gi}(W_i) = 2\sqrt{u^2(R_i) + u^2(E_i)} + E_i $ | | | | | |
| Incertidumbre expandida de un resultado de pesada, $U_{gi}(MtraB) = 0,038$ kg | | | | | |