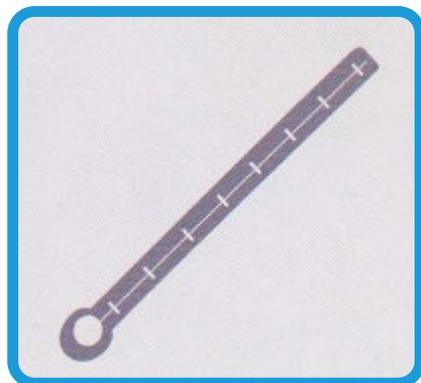
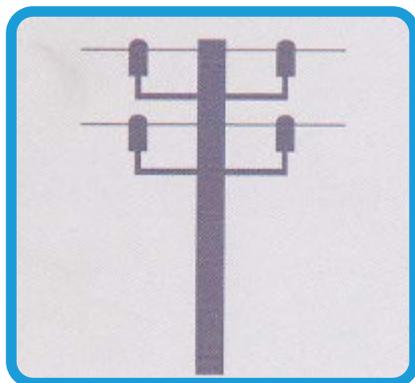
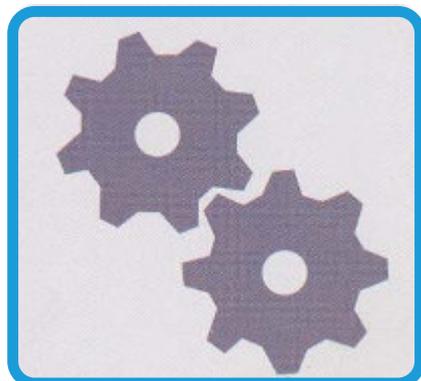
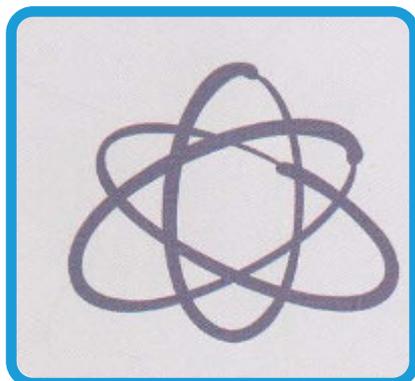
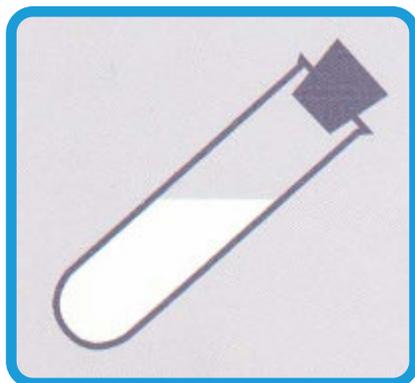
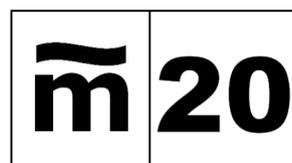


Metrología



PROCEDIMIENTO ME-025 PARA LA
DETERMINACIÓN DEL VALOR
CONVENCIONAL DE MASA



PROCEDIMIENTO ME025

DETERMINACIÓN DEL VALOR CONVENCIONAL DE MASA

La presente edición de este procedimiento se emite exclusivamente en formato digital y puede descargarse gratuitamente de nuestra página web (www.cem.es).

El procedimiento ha sido revisado, corregido y actualizado, respecto a la edición digital anterior.

Los procedimientos editados por el CEM presentan modelos de calibración, en línea con documentos clave universales como son el Sistema Internacional de unidades (SI), el Vocabulario internacional de metrología (VIM) o la Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM). Como modelos que son, los usuarios de los mismos pueden, bajo su responsabilidad, modificarlos para adecuarlos a sus necesidades específicas (instrumentación, condiciones ambientales, etc.). En tal caso, siempre deberá primar el sentido crítico y la ética profesional.

El CEM no acepta ninguna responsabilidad derivada de la interpretación y/o uso de este procedimiento.

El CEM no mantiene correspondencia sobre el contenido de los procedimientos.

ÍNDICE

	Página
1. OBJETO.....	3
2. ALCANCE.....	3
3. DEFINICIONES.....	3
4. GENERALIDADES	4
4.1. Antecedentes e introducción teórica.....	4
4.2. Símbolos y abreviaturas	4
5. DESCRIPCIÓN.....	6
5.1. Equipos materiales	6
5.2. Operaciones previas.....	7
5.3. Proceso de calibración	8
5.4. Toma y tratamiento de datos.....	9
6. RESULTADOS	11
6.1. Cálculo de incertidumbres.....	11
6.2. Interpretación de resultados.....	19
7. REFERENCIAS.....	19
8. ANEXOS	20

1. OBJETO

El presente procedimiento tiene por objeto establecer el método de calibración de masas por sustitución para la determinación de su valor convencional de masa.

2. ALCANCE

Este procedimiento es aplicable a la calibración de masas y pesas de valores nominales desde 1 mg hasta 5 000 kg en un instrumento de pesaje mediante la aplicación del método de sustitución y el empleo de una o varias masas patrón que sumen el mismo valor nominal que la masa a calibrar.

3. DEFINICIONES

Son de aplicación las definiciones generales de la referencia [1], además de otras específicas para el presente procedimiento que se indican a continuación

Calibración de masa:

A los efectos de este procedimiento se considera la calibración de masa como un conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de masa de la masa patrón objeto de la calibración, también denominada muestra, y la masa conocida de una masa denominada patrón.

Error de masa:

Desviación del valor de una masa respecto a su valor nominal.

Instrumento de pesaje:

Instrumento de medida utilizado para determinar la masa de un cuerpo a partir de la fuerza ejercida sobre el cuerpo por el campo gravitatorio terrestre.

Masa:

Es una magnitud física que determina la cantidad de materia que tiene un cuerpo.

Masa patrón:

Masa o conjunto de masas utilizadas como referencia para calibrar otras masas (muestras) o instrumentos de pesaje.

Muestra:

Masa objeto de la calibración.

Pesa:

Medida materializada de masa, regulada de acuerdo a sus características físicas y metrológicas: forma, dimensiones, material, calidad superficial, valor nominal y error máximo permitido [4].

Clase de exactitud de las pesas:

Clasificación de las pesas de acuerdo a ciertos requisitos metroológicos y límites de tolerancia expuestos en la Recomendación Internacional OIML R111 [4].

Valor convencional de masa:

Para un cuerpo a 20 °C, la masa convencional o el valor convencional del resultado de pesaje en el aire es la masa de una pesa de referencia de densidad 8 000 kg m⁻³ que la equilibra en un aire de densidad 1,2 kg·m⁻³ [4].

4. GENERALIDADES

4.1. Antecedentes e introducción teórica

El método de sustitución es un método de medida por comparación directa en el cual se reemplaza la magnitud a medir por otra de igual naturaleza con un valor tal que los efectos que provoca sobre el dispositivo indicador sean los mismos.

El procedimiento de calibración de masas mediante el método de sustitución permite calcular la masa de una muestra por comparación directa con una masa patrón, mediante una secuencia de pesaje establecida y la repetición de un número de ciclos, n .

4.2. Símbolos y abreviaturas

C	= corrección por empuje del aire.
d	= resolución del instrumento de pesaje.
d_1	= distancia del centro del plato del instrumento de pesaje al punto en el que se sitúa la carga.
d_2	= distancia del centro del plato del instrumento de pesaje al punto en el que se determina la máxima excentricidad.
g	= aceleración de la gravedad local.
h	= altura sobre el nivel del mar.
h_r	= humedad relativa del aire.
e_{cp}	= error de masa convencional del patrón.
e_{cm}	= error de masa convencional de la muestra.
I_m	= indicación del instrumento de pesaje al depositar sobre su dispositivo receptor de carga la muestra.
\bar{I}_m	= media de las indicaciones de la muestra en un ciclo de medida.
I_{m-p}	= diferencia entre el valor medio de la muestra y el del patrón para un ciclo.
\bar{I}_{m-p}	= valor medio de las diferencias de indicación entre el patrón y la muestra.

- $\bar{I}_{m-p}(\text{máx})$ = máxima diferencia de indicación.
- $\bar{I}_{m-p}(\text{min})$ = mínima diferencia de indicación.
- I_p = indicación del instrumento de pesaje al depositar sobre su dispositivo receptor de carga el patrón.
- \bar{I}_p = media de las indicaciones del patrón en un ciclo de medida.
- k = factor de cobertura.
- m_n = valor nominal de masa de la muestra.
- m_{cm} = valor de masa convencional de la muestra.
- m_{cp} = valor de masa convencional del patrón.
- $(m_{cp})_i$ = valor de masa convencional de cada patrón cuando se utilizan varios patrones.
- $m.e.p.$ = máximo error permitido.
- n = número de ciclos.
- p = presión ambiente durante la calibración.
- p_0 = presión atmosférica estándar, cuyo valor es de 101 325 Pa.
- $s(I_{m-p})$ = desviación típica de las diferencias de indicación entre el patrón y la muestra para un número n de ciclos.
- s_p = desviación típica evaluada en un instrumento bajo control estadístico a partir de un número grande de medidas.
- t = temperatura ambiente durante la calibración.
- U = máxima incertidumbre permitida para una pesa en función de su valor nominal y de su clase de exactitud.
- $u(C)$ = incertidumbre típica debida a la corrección por empuje del aire.
- $u(d)$ = incertidumbre típica debida a la resolución del instrumento de pesaje.
- $u(e_{cm})$ = incertidumbre combinada del error de masa convencional de la muestra.
- $u(\bar{I}_{m-p})$ = incertidumbre típica debida a la media de las diferencias de indicación.
- $u(m_{cm})$ = incertidumbre combinada de calibración de la masa convencional de la muestra.
- $U(m_{cm})$ = incertidumbre expandida de calibración de la masa convencional de la muestra.
- $u(m_{cp})$ = incertidumbre típica de calibración de la masa convencional del patrón.
- $U(m_{cp})$ = incertidumbre expandida de calibración de la masa convencional del patrón.

$u(\delta e)$	= incertidumbre típica debida al error de excentricidad del instrumento de pesaje.
$u(\delta m_{cp})$	= incertidumbre típica debida a la deriva del patrón.
$u(\rho_a)$	= incertidumbre combinada de la densidad del aire.
$u(\rho_m)$	= incertidumbre típica de la densidad de la muestra.
$u(\rho_p)$	= incertidumbre típica de la densidad del patrón.
$U(\rho_m)$	= incertidumbre expandida de la densidad de la muestra.
$U(\rho_p)$	= incertidumbre expandida de la densidad del patrón.
δe	= error de excentricidad del instrumento de pesaje.
δm_{cp}	= deriva de la masa convencional del patrón.
ρ_a	= densidad del aire.
$\rho_{a \max}$	= valor máximo del intervalo donde se espera encontrar la densidad del aire.
$\rho_{a \min}$	= valor mínimo del intervalo donde se espera encontrar la densidad del aire.
ρ_m	= densidad de la muestra.
$\rho_{m \max}$	= valor máximo del intervalo donde se espera encontrar la densidad de la muestra.
$\rho_{m \min}$	= valor mínimo del intervalo donde se espera encontrar la densidad de la muestra.
ρ_o	= densidad de referencia del aire igual a $1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
ρ_p	= densidad del patrón.
$(\rho_p)_i$	= densidad de cada patrón cuando se utilizan varios patrones.
$\rho_{p \max}$	= valor máximo del intervalo donde se espera encontrar la densidad del patrón.
$\rho_{p \min}$	= valor mínimo del intervalo donde se espera encontrar la densidad del patrón.

5. DESCRIPCIÓN

5.1. Equipos y materiales

Los equipos y materiales necesarios para la calibración serán los siguientes:

- Instrumento de pesaje

Se hará uso de los instrumentos de pesaje disponibles en el laboratorio, según el rango de medida y la exactitud de los mismos, dependiendo del valor nominal y clase de exactitud de las masas a calibrar.

• Patrones de masa

Es necesario disponer de patrones de masa, de una exactitud superior a la de las masas a calibrar, y de valores nominales adecuados para hacer una comparación directa. La deriva de cada patrón de masa no deberá ser mayor que la incertidumbre de calibración asociada a dicho patrón.

• Útiles de uso y limpieza

No se usará, a no ser que sea imprescindible, agua destilada, alcohol o ninguna otra sustancia para limpiar las pesas o la balanza; sólo se utilizarán brochas de cerdas suaves para eliminar motas de polvo u otro material que haya quedado sobre la superficie, o una gamuza seca que no deje pelusilla, restos de hilos, etc.

• Medidores de condiciones ambientales

Es necesario disponer de instrumentos que permitan la medida de las condiciones ambientales que nos van a proporcionar los valores de temperatura presión y humedad entre los que se realiza la calibración, además de utilizarse para el cálculo de la densidad del aire en caso de que fuese necesario.

Si no se determina la densidad del aire al menos debiera medirse la temperatura y la humedad para asegurarse que el instrumento de pesaje está trabajando en condiciones adecuadas.

• Equipos auxiliares

Útiles de manipulación de las pesas que permiten su colocación en el interior de las balanzas.

5.2. Operaciones previas

Antes de realizar la calibración se tendrán en cuenta una serie de consideraciones generales:

- a) Deberá aplicarse un sistema para identificar las muestras de forma permanente mediante un número de expediente, código, etc..., de tal manera que no pueda haber confusión alguna entre la identidad de la muestra y los resultados de las mediciones realizadas.
- b) Los instrumentos de pesaje han de estar nivelados y en ausencia de vibraciones.
- c) Los patrones de masa utilizados serán pesas calibradas, de clase de exactitud adecuada, según la exactitud de la muestra a calibrar, sabiendo que una pesa siempre debe ser calibrada con otra pesa de clase de exactitud superior (véase el anexo II).
- d) Tanto los patrones de masa utilizados como la propia balanza deberán permanecer en el laboratorio o recinto de calibración el tiempo necesario para su estabilización térmica de acuerdo a lo establecido en B.4.3 de la R111 de la OIML[4] antes de comenzar la calibración, de modo que se puedan despreciar los efectos de convección.
- e) El manejo tanto de las pesas patrón como de las muestras, debe efectuarse de forma que éstas resulten lo menos dañadas posibles y no reciban golpes, mediante el uso de los útiles de manipulación adecuados.

- f) Tras el desembalaje, se comprueba el estado superficial de las masas a calibrar y se deben limpiar siempre con brocha o pincel para retirar las posibles partículas de polvo en la zona del laboratorio destinada a tal fin.
- g) En el caso de cantidades significativas de suciedad y sólo si es estrictamente necesario, previa comunicación con el cliente y calibración anterior, la limpieza puede efectuarse mediante gamuza empapada en disolvente (agua destilada, alcohol o alcohol-éter al 50 %) respetando el tiempo de estabilización correspondiente según B.4.2 de R111 [4].
- h) Las masas a calibrar, una vez limpias, deben almacenarse en un lugar seguro del recinto donde esté situado el instrumento de pesaje y junto con los patrones por un periodo de tiempo necesario para estabilizarse a la temperatura de la sala.
- i) La sala en la que se realiza la calibración debe mantener las condiciones ambientales lo más estables posibles, y en su caso, en los márgenes que establezca la reglamentación específica, asegurando el buen funcionamiento del instrumento de pesaje. (Véase OIML R111 [4]).
- j) Todos los equipos utilizados para la calibración, tanto pesas como instrumentos de medida de condiciones ambientales, deberán tener en vigor su correspondiente certificado de calibración.

5.3. Proceso de Calibración

Secuencia de calibración

Para determinar la masa convencional de una muestra se han de seguir los siguientes pasos:

- a.- Determinación de la desviación al nominal de la muestra y ajuste de la misma si es necesario y se desea.
- b.- Toma de datos de las condiciones ambientales, en su caso: temperatura del aire, temperatura del punto de rocío o humedad relativa y presión atmosférica, al menos, al inicio y al final de la calibración.
- c.- Realización de un ciclo de medida según la secuencia elegida, por ejemplo:
 - patrón - muestra - muestra - patrón (p-m-m-p)
 - patrón - muestra - patrón (p-m-p)
 - patrón - muestra₁ - ... - muestra_n - patrón (p-m₁-...-m_n-p)

(En el presente procedimiento la secuencia elegida es (p-m-m-p).

La secuencia (p-m₁-...-m_n-p), se usará sólo para calibración de pesas de clase de exactitud M₁ o inferior)

- d.- Repetición del ciclo de medida n veces ($n \geq 3$).
- e.- Estimación del valor de masa convencional de las masas a calibrar y estimación de sus incertidumbres asociadas.

Proceso de realización

El procedimiento de calibración de masas por el método de sustitución, consiste en la repetición de n ciclos de medida, en cada uno de los cuales se colocan alternativamente la masa patrón y la masa muestra sobre el instrumento de pesaje, siguiendo la secuencia:

patrón - muestra - muestra - patrón (p-m-m-p)

siendo el patrón de igual valor nominal que la muestra y, en el caso en que la diferencia de indicación entre ambas sea muy grande, se colocará conjuntamente con el patrón y/o con la muestra las masas adicionales que se consideren necesarias a fin de disminuir el valor de las diferencias de indicación.

Si después de una calibración, se observa que el valor de masa convencional de la muestra, teniendo en cuenta su incertidumbre, se encuentra fuera de los límites de los máximos errores permitidos dados por la recomendación internacional OIML R111 [4] (véase el anexo II) para su clase de exactitud, la pesa debería ajustarse. El ajuste de una pesa siempre se realizará con la autorización del cliente. Una vez ajustada la pesa se volverá a calibrar. En el certificado de calibración deberán figurar los valores de masa antes y después del ajuste.

Las masas deben colocarse lo más centradas posible sobre el dispositivo receptor de carga del instrumento de pesaje para evitar el error de excentricidad.

Los resultados serán anotados cuando se haya estabilizado la indicación.

Requisitos a considerar

La variación de las condiciones ambientales durante la realización de la calibración habrá de tenerse en cuenta en el análisis de la incertidumbre de la densidad del aire.

La desviación típica de las diferencias de indicaciones de la muestra y el patrón debe ser menor o igual a la asignada al instrumento de pesaje para ese valor nominal, s_p (véase el apartado 6.1).

5.4. Toma y tratamiento de datos

Se coloca la masa patrón (p) o la muestra (m) sobre el dispositivo receptor de carga del instrumento de pesaje anotando la lectura o indicación (I_p ó I_m), de forma que en cada ciclo "p-m-m-p" se obtiene un conjunto de cuatro valores de indicación I_{p1} , I_{m1} , I_{m2} , I_{p2} .

La masa convencional de la muestra se determina mediante la ecuación [4]:

$$m_{cm} = (m_{cp} + \delta m_{cp}) \cdot (1 + C) + \bar{I}_{m-p} + \delta d + \delta e \quad (1)$$

- El valor de masa del patrón, m_{cp} , es el valor de masa convencional del patrón en el momento de su calibración, dado en su Certificado de Calibración según la expresión:

$$m_{cp} = m_n + e_{cp} \quad (2)$$

siendo m_n el valor nominal, y e_{cp} el error de masa convencional del patrón.

- La deriva del patrón, δm_{cp} , es la deriva de la masa convencional del patrón desde su última calibración. Este término, en general, no se evalúa para corregirlo, pero sí para la contribución a la incertidumbre.
- Corrección debida al diferente empuje ejercido por el aire sobre la muestra y el patrón, C . [4]

$$C = (\rho_a - \rho_0) \cdot \left(\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho_p} \right) \quad (3)$$

siendo $\rho_0 = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

- Las densidades de la muestra y el patrón pueden obtenerse de su certificado de calibración, ser suministradas por el fabricante u obtenerse de valores tabulados en función del material.

NOTA: Si la pesa se ajustó y el material con el que se ajustó era de densidad diferente al material de la propia pesa, la densidad final de la pesa vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{100}{\frac{x}{\rho_x} + \frac{y}{\rho_y}} \quad (4)$$

donde un material X con densidad ρ_x contribuye un x por ciento a la masa final, y un material Y con densidad ρ_y contribuye un y por ciento a la masa final.

- La densidad del aire se puede calcular de acuerdo a lo establecido en el Anexo I.
- La indicación media, \bar{I}_{m-p} , se determina de la siguiente manera:

A partir de los valores de indicación leídos: I_{p1} , I_{m1} , I_{m2} , I_{p2} , se calcula la diferencia entre el valor medio de indicación de la muestra y el del patrón para cada ciclo:

$$\bar{I}_{m-p} = \bar{I}_m - \bar{I}_p = \frac{\bar{I}_{m1} + \bar{I}_{m2}}{2} - \frac{\bar{I}_{p1} + \bar{I}_{p2}}{2} \quad (5)$$

Se repite un total de n ciclos obteniendo un conjunto de valores $I_{(m-p)i}$, para $i = 1, 2, \dots, n$, a partir de los que se calcula un valor medio \bar{I}_{m-p} :

$$\bar{I}_{m-p} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{(m-p)i}}{n} \quad (6)$$

- La resolución del instrumento de pesaje, δd , la obtenemos del manual del instrumento, y será tomada en cuenta como contribución a la incertidumbre.
- La excentricidad del instrumento de pesaje, δe , generalmente se considera despreciable si la muestra y el patrón son situadas en el centro del dispositivo

receptor de carga. En el caso de no ser despreciable, sólo será tomada en cuenta como contribución a la incertidumbre.

Según esto, podemos decir que la ecuación (1) de la masa convencional de la muestra tendrá la siguiente expresión:

$$m_{cm} = [m_{cp} + \delta m_{cp}] \cdot \left[1 + (\rho_a - \rho_0) \cdot \left(\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho_p} \right) \right] + \bar{I}_{m-p} + \delta d + \delta e \quad (7)$$

Una vez calculada la masa convencional de la muestra se puede calcular el error convencional de masa o desviación al nominal, mediante la ecuación:

$$e_{cm} = m_{cm} - m_n \quad (8)$$

En el caso de utilizar varios patrones, cuyas masas son $(m_{cp})_i$ y densidades $(\rho_p)_i$, siendo $i = 1 \dots z$, tendremos en cuenta las siguientes consideraciones:

La masa del conjunto de patrones, será:

$$m_{cp} = \sum_{i=1}^z (m_{cp})_i \quad (9)$$

La densidad del conjunto de patrones, será:

$$\rho_p = \frac{\sum_{i=1}^z (m_{cp})_i}{\sum_{i=1}^z \frac{(m_{cp})_i}{(\rho_p)_i}} \quad (10)$$

6. RESULTADOS

Una vez finalizados los ensayos de calibración, y obtenidos los valores necesarios para la calibración del instrumento, es necesario analizar los resultados finales y asignar unos valores de incertidumbre. Estos resultados se darán de una forma clara, indicando los valores encontrados de los errores o de las correcciones y sus respectivas incertidumbres.

6.1. Cálculo de incertidumbres

Para la estimación y cálculo de las incertidumbres se han aplicado los criterios establecidos en la Guía de Incertidumbres de Medida, editada por el Centro Español de Metrología, que ha tomado como base la guía *ISO* "Guía para la expresión de la incertidumbre de medida", [2] y la guía *EA-4/02* "Evaluación de la incertidumbre de medida en las calibraciones" [3].

- a) La ecuación que define la magnitud de salida en función de las magnitudes de entrada es:

$$m_{cm} = (m_{cp} + \delta m_{cp}) \cdot (1 + C) + \bar{I}_{m-p} + \delta d + \delta e \quad (1)$$

Las magnitudes de entrada están definidas en el apartado 4.

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a la ecuación (1), considerando todas las variables independientes, se obtiene:

$$u^2(m_{cm}) = (1 + C)^2 \cdot u^2(m_{cp}) + (1 + C)^2 \cdot u^2(\delta m_{cp}) + (m_{cp} + \delta m_{cp})^2 \cdot u^2(C) + u^2(\bar{I}_{m-p}) + u^2(\delta d) + u^2(\delta e) \quad (11)$$

b) A continuación se indica cómo se calcula cada una de las incertidumbres típicas asociadas a las magnitudes de entrada de la ecuación (1):

- La incertidumbre típica de calibración de la masa del patrón en el momento de la calibración, $u(m_{cp})$, se obtendrá de la incertidumbre dada en su Certificado de Calibración, $U(m_{cp})$, para el factor de cobertura correspondiente k .

$$u(m_{cp}) = \frac{U(m_{cp})}{k} \quad (12)$$

En el caso de realizar la calibración con varios patrones que estén correlacionados (p.e. un juego de masas que se han calibrado simultáneamente en un determinado laboratorio) se tendrá:

$$u(m_{cp}) = \sum (u(m_{cp})_i) \quad (13)$$

- La incertidumbre típica debida a la deriva del patrón, $u(\delta m_{cp})$, se puede calcular de la siguiente manera:

Partiendo del histórico de calibraciones sucesivas del patrón, se estima una variación de su masa, δm_{cp} , que puede venir dada por la diferencia máxima de masa entre dos calibraciones sucesivas, o puede ser evaluada a partir de otros criterios basados en la experiencia. La incertidumbre debida a la deriva será:

$$u(\delta m_{cp}) = \frac{\delta m_{cp}}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

Si no se tiene un histórico de las calibraciones sucesivas del patrón, la incertidumbre debida a la deriva máxima puede darse como:

$$u(\delta m_{cp}) = \frac{U(m_{cp})}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

- Incertidumbre típica debida a la corrección por empuje del aire, $u(C)$.

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a la ecuación (3), y teniendo en cuenta la posible covarianza que existe entre m_{cp} y ρ_p si hacemos las siguientes consideraciones:

- el coeficiente de correlación $r = \frac{u(m_{cp};\rho_p)}{u(m_{cp})u(\rho_p)}$
- $(1+C) \sim 1$
- $m_{cp1} \sim m_{cp}$

la incertidumbre debida a la corrección por empuje del aire $u(C)$ será, ecuación (C.6.3-1) de [4]:

$$u^2(C) = \left[\frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p \rho_m} u(\rho_a) \right]^2 + [(\rho_a - \rho_0)]^2 \frac{u^2(\rho_m)}{\rho_m^4} + (\rho_a - \rho_0)[(\rho_a - \rho_0) - 2(\rho_{a1} - \rho_0)] \frac{u^2(\rho_p)}{\rho_p^4} \quad (16)$$

donde ρ_{a1} es la densidad del aire durante la calibración del patrón.

- Incertidumbre típica debida a la densidad del aire, $u(\rho_a)$.

Esta incertidumbre se calcula según lo descrito en el Anexo I.

- Incertidumbre típica debida a la densidad de la muestra y a la densidad del patrón, $U(\rho_m)$ y $U(\rho_p)$

Si $U(\rho_m)$ y $U(\rho_p)$ son datos suministrados por el fabricante, y se conoce el factor de cobertura correspondiente k :

$$u(\rho_p) = \frac{U(\rho_p)}{k}; \quad u(\rho_m) = \frac{U(\rho_m)}{k} \quad (17)$$

Si no se conoce el factor de cobertura correspondiente k , pero sí los límites máximos de las incertidumbres $U(\rho_m)$ y $U(\rho_p)$ o si ρ_m y ρ_p son datos obtenidos a partir de valores tabulados en función del material:

$$u(\rho_p) = \frac{U(\rho_p)}{\sqrt{3}}; \quad u(\rho_m) = \frac{U(\rho_m)}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

Si ρ_m y ρ_p se obtienen a partir de un intervalo donde se espera encontrar con gran seguridad el valor de dicha densidad, $[\rho_{m \text{ máx}} - \rho_{m \text{ mín}}]$ y $[\rho_{p \text{ máx}} - \rho_{p \text{ mín}}]$, a partir de ese intervalo se estimará la incertidumbre como:

$$u(\rho_p) = \frac{[\rho_p \text{ máx} - \rho_p \text{ mín}]}{\sqrt{12}}; u(\rho_m) = \frac{[\rho_m \text{ máx} - \rho_m \text{ mín}]}{\sqrt{12}} \quad (19)$$

siempre que los valores de densidad tomados sean los valores medios del intervalo, y si no, se tomará el caso más desfavorable:

$$u(\rho_p) = \frac{[\rho_p \text{ máx} - \rho_p \text{ mín}]}{\sqrt{3}}; u(\rho_m) = \frac{[\rho_m \text{ máx} - \rho_m \text{ mín}]}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

En el caso de utilizar varios patrones de masas (m_{cp}) con densidades $(\rho_p)_i$, siendo $i=1\dots z$, aplicando la ley de propagación de incertidumbres a la ecuación (10), la incertidumbre de la densidad del patrón será:

$$u^2(\rho_p) = \frac{(\rho_p)_i^2}{\left(\sum \frac{(m_{cp})_i}{(\rho_p)_i}\right)^2} \cdot \sum_{i=1}^z \frac{(m_{cp})_i^2}{(\rho_p)_i^4} \cdot u^2(\rho_p)_i^2 \quad (21)$$

- Incertidumbre típica debida a la diferencia de indicación, $u(\bar{I}_{m-p})$.

Puede calcularse como:

$$u(\bar{I}_{m-p}) = \frac{s(I_{m-p})}{\sqrt{n}} \quad (22)$$

siendo
$$s(I_{m-p}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [I_{(m-p)_i} - \bar{I}_{m-p}]^2}{n-1}} \quad (23)$$

Puede también calcularse a partir de una varianza, s_p , evaluada en el instrumento bajo control estadístico de un número grande de ensayos, que caracterice mejor la dispersión que la desviación típica estimada a partir de un número limitado de observaciones. En ese caso:

$$u(\bar{I}_{m-p}) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \quad (24)$$

Si el número de ciclos es pequeño, $n \leq 3$, se recomienda estimar la incertidumbre típica como:

$$u(\bar{I}_{m-p}) = \frac{\bar{I}_{m-p}(\text{máx}) - \bar{I}_{m-p}(\text{mín})}{\sqrt{12}} \quad (25)$$

- La incertidumbre típica debida a la resolución, $u(\delta d)$, es:

$$u(\delta d) = \frac{d}{\sqrt{6}} \quad (26)$$

- La incertidumbre típica debida al error de excentricidad, $u(\delta e)$, se calcula considerando una distribución rectangular:

$$u(\delta e) = \frac{\delta e}{\sqrt{12}} \quad (27)$$

- En algunos casos, (fundamentalmente en instrumentos de pesaje con plato receptor de carga grandes), puede estimarse el error de excentricidad mediante la proporción $\frac{d_1}{d_2} \delta e$. Siendo d_1 la distancia del centro del plato al punto en el que se sitúa la carga, y d_2 la distancia del centro del plato al punto en el que se determina la máxima excentricidad δe .

En este caso la incertidumbre debida al error de excentricidad es:

$$u(\delta e) = \frac{\frac{d_1}{d_2} \delta e}{\sqrt{12}} \quad (28)$$

La contribución a la incertidumbre debida a la variación de temperatura durante las medidas es despreciable si las variaciones de temperatura durante la calibración se encuentran en los límites marcados en C.2.1 de la R111.

Si se desea conocer la incertidumbre asociada al error convencional de la muestra, aplicando la ley de propagación de incertidumbres a la ecuación (8), se obtiene:

$$u(e_{cm}) = u(m_{cm}) \quad (29)$$

- c) La incertidumbre expandida será:

$$U(m_{cm}) = k \cdot u(m_{cm}) \quad (30)$$

El valor del factor de cobertura k depende del tipo de distribución de probabilidad de $u(m_{cm})$ que resulta de la convolución de las distribuciones de probabilidad de todas sus contribuciones.

En la mayoría de los casos se puede considerar que la distribución de $u(m_{cm})$ sea normal, sin necesidad de calcular los grados de libertad efectivos, por tanto se considera $k=2$ para un nivel de confianza del 95,45 %.

Los grados de libertad efectivos se pueden calcular según el anexo E de EA-4/02 [3].

NOTA: Puede darse $U(m_{cm}) = \frac{m.e.p.}{3}$, siempre y cuando la $U(m_{cm})$ calculada sea menor.

A partir de las contribuciones consideradas, puede construirse la tabla siguiente:

magnitud de entrada X_i	Valor estimado	incertidumbre típica $u(x_i)$	distribución de probabilidad	coeficiente de sensibilidad c_i	contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
$(m_{cp})_i$	$m_n + e_{cp}$	$\frac{U(m_{cp})_c}{k}$	normal	$(1+C)$	$(1+C) \frac{U(m_{cp})_i}{k}$
δm_{cp}	0	$\frac{\delta m_{cp}}{\sqrt{3}}$ o $\frac{U(m_{cp})_c}{\sqrt{3}}$	rectangular	$(1+C)$	$(1+C) \frac{\delta m_{cp}}{\sqrt{3}}$ o $(1+C) \frac{U(m_{cp})_c}{\sqrt{3}}$
ρ_a	ρ_a	$u(\rho_a)$	normal	$(m_{cp}) \cdot \left(\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho_a}\right)$	$(m_{cp}) \cdot \left(\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho_a}\right) \cdot u(\rho_a)$
ρ_p	ρ_p (certificado) o	$\frac{U_c(\rho_p)}{k}$ o	normal	$\frac{m_{cp}}{\rho_p^2} \sqrt{(\rho_a - \rho_0)[(\rho_a - \rho_0) - 2(\rho_{a1} - \rho_0)]}$	$\frac{m_{cp}}{\rho_p^2} \sqrt{(\rho_a - \rho_0)[(\rho_a - \rho_0) - 2(\rho_{a1} - \rho_0)]} \frac{U_c(\rho_p)}{k}$
	ρ_p (fabricante) o	$\frac{U_f(\rho_p)}{\sqrt{3}}$ o	rectangular		$\frac{m_{cp}}{\rho_p^2} \sqrt{(\rho_a - \rho_0)[(\rho_a - \rho_0) - 2(\rho_{a1} - \rho_0)]} \frac{U_f(\rho_p)}{\sqrt{3}}$
	$\rho_p = \frac{\rho_p \text{ máx} - \rho_p \text{ min}}{2}$ o	$\frac{[\rho_p \text{ máx} - \rho_p \text{ min}]}{\sqrt{12}}$ o	rectangular		$\frac{m_{cp}}{\rho_p^2} \sqrt{(\rho_a - \rho_0)[(\rho_a - \rho_0) - 2(\rho_{a1} - \rho_0)]} \frac{[\rho_p \text{ máx} - \rho_p \text{ min}]}{\sqrt{12}}$
	$\rho_p \in [\rho_p \text{ máx}, \rho_p \text{ min}]$	$\frac{[\rho_p \text{ máx} - \rho_p \text{ min}]}{\sqrt{3}}$	rectangular		$\frac{m_{cp}}{\rho_p^2} \sqrt{(\rho_a - \rho_0)[(\rho_a - \rho_0) - 2(\rho_{a1} - \rho_0)]} \frac{[\rho_p \text{ máx} - \rho_p \text{ min}]}{\sqrt{3}}$
ρ_m	ρ_m (certificado) o	$\frac{U_c(\rho_m)}{k}$ o	normal	$m_{cp}(\rho_a - \rho_0) \left(-\frac{1}{\rho_m^2}\right)$	$m_{cp}(\rho_a - \rho_0) \left(-\frac{1}{\rho_m^2}\right) \frac{U_c(\rho_m)}{k}$
	ρ_m (fabricante) o	$\frac{U_f(\rho_m)}{\sqrt{3}}$ o	rectangular		$m_{cp}(\rho_a - \rho_0) \left(-\frac{1}{\rho_m^2}\right) \frac{U_f(\rho_m)}{\sqrt{3}}$
	$\rho_m = \frac{\rho_m \text{ máx} - \rho_m \text{ min}}{2}$ o	$\frac{[\rho_m \text{ máx} - \rho_m \text{ min}]}{\sqrt{12}}$ o	rectangular		$m_{cp}(\rho_a - \rho_0) \left(-\frac{1}{\rho_m^2}\right) \frac{[\rho_m \text{ máx} - \rho_m \text{ min}]}{\sqrt{12}}$
	$\rho_m \in [\rho_m \text{ máx}, \rho_m \text{ min}]$	$\frac{[\rho_m \text{ máx} - \rho_m \text{ min}]}{\sqrt{3}}$	rectangular		$m_{cp}(\rho_a - \rho_0) \left(-\frac{1}{\rho_m^2}\right) \frac{[\rho_m \text{ máx} - \rho_m \text{ min}]}{\sqrt{3}}$

magnitud de entrada X_i	Valor estimado	incertidumbre típica $u(x_i)$	distribución de probabilidad	coeficiente de sensibilidad c_i	contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
\bar{I}_{m-p}	$\frac{\sum_{i=1}^n I_{(m-p)_i}}{n}$	$\frac{s(I_{m-p})}{\sqrt{n}}$ o $\frac{s_p}{\sqrt{n}}$ $\frac{\bar{I}_{m-p}(\text{máx}) - \bar{I}_{m-p}(\text{min})}{\sqrt{12}}$	normal o rectangular	1	$\frac{s(I_{m-p})}{\sqrt{n}}$ o $\frac{s_p}{\sqrt{n}}$ o $\frac{\bar{I}_{m-p}(\text{máx}) - \bar{I}_{m-p}(\text{min})}{\sqrt{12}}$
δd	0	$\frac{d}{\sqrt{6}}$	rectangular	1	$\frac{d}{\sqrt{6}}$
δe	0	$\frac{\delta e}{\sqrt{12}}$	rectangular	1	$\frac{\delta e}{\sqrt{12}}$
Incertidumbre combinada					$u(m_{cm}) = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
Incertidumbre expandida					$U(m_{cm}) = k \cdot u(m_{cm})$

NOTA: Esta tabla sirve para poder comparar las incertidumbres de las distintas componentes. Debido a que hay una covarianza entre la densidad del patrón y el valor de masa convencional del patrón, la contribución a la incertidumbre de $u(m_{cm})$ debida a la incertidumbre de la densidad del patrón $u(\rho_p)$ puede ser imposible realizar el cálculo individualmente. Deberá ser calculada la incertidumbre debida al empuje del aire en su conjunto según la ecuación (16) a la que contribuyen las incertidumbres del aire, de la densidad de la muestra y de la densidad del patrón.

6.2.- Interpretación de resultados

La calibración de una masa, denominada en el presente documento como muestra, consistirá en determinar el valor de su error convencional de masa y la incertidumbre asociada a dicho valor, tal y como se describe en los puntos 5.4 y 6.1, respectivamente.

Según el criterio de la recomendación internacional OIML R111 [4], para que una pesa esté dentro de su clase de exactitud, su error convencional de masa determinado no debe ser mayor que el máximo error permitido para ese valor nominal.

El certificado especificará la masa convencional de las pesas calibradas preferentemente desglosada en valor nominal y error convencional de masa, junto con la incertidumbre asociada a dicho valor. Dicha incertidumbre corresponderá a la incertidumbre expandida detallando además el factor de cobertura o el nivel de confianza asociado, generalmente el 95,45%. Si se hubiera realizado un ajuste de la pesa previo a su calibración, el certificado especificará los valores de masa antes y después del ajuste.

El periodo de recalibración debe establecerse en cada caso particular en función de las condiciones y frecuencia de uso, el material y la incertidumbre requerida. Un criterio posible es fijar los periodos de recalibración de manera que se asegure que la deriva de las masas en ese periodo no sobrepase su incertidumbre expandida de calibración. En cualquier caso el responsable final de asignar el periodo de recalibración es siempre el usuario del equipo.

7.- REFERENCIAS

- [1] Vocabulario Internacional de Metrología VIM, 3ª edición 2012 (español).
- [2] JCGM 100: 2008, Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida. EDICIÓN DIGITAL 1 en español (traducción 1ª Ed. Sept. 2008) Primera edición Septiembre 2008 (original en inglés). Centro Español de Metrología.
- [3] Guía EA-4/02 M: 2013. Evaluación de la incertidumbre de medida en calibraciones (Español) E.A.
- [4] Internacional Recommendation OIML R 111-1 Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ y M₃. Part 1: Metrological and technical requirements. Edition 2004.
- [5] Giacomo; P. "Equation for the Determination of the Density of Moist Air"; 1982; Metrologia 18; 33-40.
- [6] A.Picard, R. S. Davis, M. Gläser and K. Fujii."Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007); Metrología 45 (2008) 149-155.
- [7] M.Gläser. Short Communication "Covariances in the determination of conventional mass"; Metrologia, 2000, 37 249-251.

- [8] OIML International Document D 28. Conventional value of the result of weighing in air (Revision of R 33, 2004).
- [9] EURAMET/cg-18 v.04: 2015 Español, Calibración de instrumentos de pesaje no automático. Original en inglés, traducción al Español 2015. Centro Español de Metrología.

8.- ANEXOS

8.1.- ANEXO I: Determinación de la densidad del aire húmedo

La determinación de la densidad del aire y su incertidumbre se puede calcular a partir de la ecuación del CIPM-2007 [6].

Dicha ecuación se basa en la fórmula para la determinación de la densidad del aire húmedo de P. Giacomo (1981) [5] con los valores adaptados a la nueva escala de temperatura EIT-(90) (denominada ecuación CIPM-81/91) y con los valores actualizados de la fracción molar del argón y de la constante de los gases, R.

8.1.1.- Símbolos y Abreviaturas

p	presión
T	temperatura termodinámica ambiente expresada en kelvin
t	temperatura expresada en grados Celsius
h	humedad relativa del aire
t_d	temperatura del punto de rocío
R	constante molar de los gases
Z	factor de compresibilidad
M	masa molar del gas
ρ_a	densidad del aire
χ_v	fracción molar de vapor de agua
M_v	masa molar de vapor de agua
M_a	masa molar de aire seco
f	factor de aumento
p_{sv}	presión de saturación de vapor de agua
$u(\rho_a)$	incertidumbre de la densidad del aire
$u(p)$	incertidumbre de la presión
$u(t)$	incertidumbre de la temperatura
$u(t_d)$	incertidumbre de la temperatura de rocío

$u(\bar{f})$ incertidumbre de la fórmula

8.1.2.- Proceso de determinación

La ecuación que determina la densidad del aire partiendo de la ecuación de los gases reales es:

$$\rho_a = p \cdot M_a \left[1 - \chi_v (1 - M_v / M_a) \right] / ZRT \quad (31)$$

Esta ecuación contiene una serie de parámetros que son considerados constantes R , M_v , M_a y otros, χ_v y Z , que serán función de las condiciones ambientales experimentales.

Constante molar de los gases: $R = 8,314\ 472\ \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

Masa molar de aire seco: $M_a = 28,965\ 46 \times 10^{-3}\ \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$

Masa molar de agua: $M_v = 18,015 \times 10^{-3}\ \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$

Fracción molar: χ_v

Es medida directamente en función de la humedad relativa del aire h o de la temperatura del punto de rocío t_d .

$$\chi_v = f(p, t_d) \cdot p_{sv}(t_d) \cdot p^{-1} \quad (32)$$

$$\chi_v = h \cdot f(p, t) \cdot p_{sv}(t) \cdot p^{-1} \quad (33)$$

$$p_{sv}(t) = \exp(AT^2 + BT + C + D/T)\ \text{Pa} \quad (34)$$

$$p_{sv}(t_d) = \exp(AT_d^2 + BT_d + C + D/T_d)\ \text{Pa} \quad (35)$$

Siendo:

$$A = 1,237\ 884\ 7 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-2}$$

$$B = -1,912\ 131\ 6 \times 10^{-2}\ \text{K}^{-1}$$

$$C = 33,937\ 110\ 47$$

$$D = -6,343\ 164\ 5 \times 10^3\ \text{K}$$

T es la temperatura termodinámica expresada en kelvin.

“ f ” es el llamado factor de aumento, debido a que el aire húmedo no se comporta como un gas perfecto.

$$f(p, t) = \alpha + \beta_p + \gamma t^2 \quad (36)$$

$$f(p, t_d) = \alpha + \beta_p + \gamma t_d^2 \quad (37)$$

con

$$\alpha = 1,000\ 62$$

$$\beta = 3,14 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$$

$$\gamma = 5,6 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$$

La temperatura t es expresada en grados Celsius y la presión p en pascales.

Factor de compresibilidad: Z

$$Z = 1 - pT^{-1} \left[(a_0 + a_1t + a_2t^2) + (b_0 + b_1t)\chi_v + (c_0 + c_1t)\chi_v^2 \right] + p^2T^2 \left(d + e\chi_v^2 \right) \quad (38)$$

siendo:

$$a_0 = 1,58123 \times 10^{-6} \text{ K}\cdot\text{Pa}^{-1}$$

$$a_1 = -2,9331 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$$

$$a_2 = 1,1043 \times 10^{-10} \text{ K}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$$

$$b_0 = 5,707 \times 10^{-6} \text{ K}\cdot\text{Pa}^{-1}$$

$$b_1 = -2,051 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$$

$$c_0 = 1,9898 \times 10^{-4} \text{ K}\cdot\text{Pa}^{-1}$$

$$c_1 = -2,376 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$$

$$d = 1,83 \times 10^{-11} \text{ K}^2\cdot\text{Pa}^{-2}$$

$$e = -0,765 \times 10^{-8} \text{ K}^2\cdot\text{Pa}^{-2}$$

Una vez medidas las condiciones ambientales, la densidad del aire puede calcularse con la expresión siguiente:

$$\rho_a = 3,483\ 740 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{p}{ZT} \right) \cdot \left(1 - 0,378\ 0 \cdot \chi_v \right) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \quad (39)$$

8.1.3.- Otras expresiones para la determinación de la densidad del aire

De acuerdo a la referencia [9] existen otras expresiones más simples, pero con mayor incertidumbre, para la determinación de la densidad del aire, que se recogen a continuación:

8.1.3.1- Versión exponencial

$$\rho_a = \frac{0,34848 \cdot p - 0,009 \cdot h_r \cdot \exp(0,061 \cdot t)}{273,15 + t} \quad (40)$$

donde:

p , es la presión atmosférica en hPa (mbar).

t , es la temperatura en °C.

h_r , es la humedad relativa del aire en %.

con una incertidumbre relativa de: $u_{(formula)}/\rho_a < 2 \times 10^{-4}$

8.1.3.2- Densidad media del aire

Se podrá utilizar la siguiente fórmula simplificada cuando no sea posible medir la temperatura ni la presión en el laboratorio:

$$\rho_a = \rho_0 \cdot \left(-\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot h \right) \quad (41)$$

donde:

$$P_0 = 101\,325 \text{ Pa}$$

$$\rho_0 = 1,2 \text{ kg m}^{-3}$$

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

h = altura sobre el nivel del mar en m.

Este cálculo de la densidad del aire es aplicable a 20 °C y 50 % con una incertidumbre relativa de: $u_{(formula)}/\rho_a < 1,2 \times 10^{-2}$

8.1.3.- Incertidumbre de la densidad del aire

De todas las contribuciones de incertidumbre es importante distinguir entre:

a) Contribución de incertidumbre debida a los parámetros medidos $u(t)$, $u(p)$ y $u(t_d)$. Si dichos parámetros no se han medido y habrá que hacer estimaciones de su posible variación durante la calibración y considerar estas estimaciones como incertidumbres a asignar como distribuciones rectangulares.

b) Contribución de incertidumbre debida a la fórmula, $u(f)$.

Aplicando pues la ley de propagación de varianzas:

$$\left[\frac{u(\rho_a)}{\rho_a} \right]^2 = \left[\frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\delta \rho_a}{\delta p} \cdot u(p) \right]^2 + \left[\frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\delta \rho_a}{\delta t} \cdot u(t) \right]^2 + \left[\frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\delta \rho_a}{\delta t_d} \cdot u(t_d) \right]^2 + u^2(f) \quad (42)$$

o bien:

$$\left[\frac{u(\rho_a)}{\rho_a} \right]^2 = \left[\frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\delta \rho_a}{\delta p} \cdot u(p) \right]^2 + \left[\frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\delta \rho_a}{\delta t} \cdot u(t) \right]^2 + \left[\frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\delta \rho_a}{\delta h} \cdot u(h) \right]^2 + u^2(f) \quad (43)$$

Analizando cada uno de estos miembros obtenemos los siguientes valores dados en [6]:

$$\frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{d\rho_a}{dT} = -4 \times 10^{-3} \text{ (1/K)}$$

$$\frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{d\rho_a}{dp} = 1 \times 10^{-5} \text{ (1/Pa)}$$

$$\frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{d\rho_a}{dt_d} = -3 \times 10^{-4} \text{ (1/K)}$$

$$\frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{d\rho_a}{dh} = -9 \times 10^{-3}$$

$$u(f) = 10,3 \times 10^{-5}$$

Los valores $u(t)$, $u(p)$ y $u(t_d)$ depende de los instrumentos de medida de condiciones ambientales que son utilizados.

8.2.- ANEXO II: Tabla de máximos errores permitidos

Valor nominal	Máximo error permisible $\pm \delta m$ en mg								
	Clase E ₁	Clase E ₂	Clase F ₁	Clase F ₂	Clase M ₁	Clase M ₁₋₂	Clase M ₂	Clase M ₂₋₃	Clase M ₃
5 000 kg			25 000	80 000	250 000	500 000	800 000	1 600 000	2 500 000
2 000 kg			10 000	30 000	100 000	200 000	300 000	600 000	1 000 000
1 000 kg		1 600	5 000	16 000	50 000	100 000	160 000	300 000	500 000
500 kg		800	2 500	8 000	25 000	50 000	80 000	160 000	250 000
200 kg		300	1 000	3 000	10 000	20 000	30 000	60 000	100 000
100 kg		160	500	1 600	5 000	10 000	16 000	30 000	50 000
50 kg	25	80	250	800	2 500	5 000	8 000	16 000	25 000
20 kg	10	30	100	300	1 000		3 000		10 000
10 kg	5,0	16	50	160	500		1 600		5 000
5 kg	2,5	8,0	25	80	250		800		2 500
2 kg	1,0	3,0	10	30	100		300		1 000
1 kg	0,5	1,6	5,0	16	50		160		500
500 g	0,25	0,8	2,5	8,0	25		80		250
200 g	0,10	0,3	1,0	3,0	10		30		100
100 g	0,05	0,16	0,5	1,6	5,0		16		50
50 g	0,03	0,10	0,30	1,0	3,0		10		30
20 g	0,025	0,08	0,25	0,8	2,5		8,0		25
10 g	0,020	0,06	0,20	0,6	2,0		6,0		20
5 g	0,016	0,05	0,16	0,5	1,6		5,0		16
2 g	0,012	0,04	0,12	0,4	1,2		4,0		12
1 g	0,010	0,03	0,10	0,3	1,0		3,0		10
500 mg	0,008	0,025	0,08	0,25	0,8		2,5		
200 mg	0,006	0,020	0,06	0,20	0,6		2,0		
100 mg	0,005	0,016	0,05	0,16	0,5		1,6		
50 mg	0,004	0,012	0,04	0,12	0,4				
20 mg	0,003	0,010	0,03	0,10	0,3				
10 mg	0,003	0,008	0,025	0,08	0,25				
5 mg	0,003	0,006	0,020	0,06	0,20				
2 mg	0,003	0,006	0,020	0,06	0,20				
1 mg	0,003	0,006	0,020	0,06	0,20				

8.3.- ANEXO III

Ejemplo numérico

Calibración de una masa de 2 kg de clase de exactitud M_1 en un comparador de masa monoplato por comparación directa con un patrón de igual valor nominal y aplicación del método de sustitución.

El material de la pesa es latón cromado cuya densidad corresponde a un valor de $8\,400\text{ kg/m}^3$, tomando de la bibliografía como incertidumbre del mismo un intervalo de 400 kg/m^3 .

El comparador de masa tiene una resolución de 1 mg.

El procedimiento de calibración utilizado consiste en la repetición de 6 ciclos de pesada en cada uno de los cuales se coloca alternativamente la masa patrón (p) y la muestra (m) sobre el plato de la balanza siguiendo la secuencia p - m - m - p .

Como patrón se utiliza una masa de valor nominal 2 kg, de clase de exactitud F_2 y de material acero inoxidable. El valor de su densidad así como la incertidumbre asociada son suministrados por el propio fabricante:

$$\rho_p = 7\,900\text{ kg/m}^3 ; U(\rho_p) = 100\text{ kg/m}^3 \text{ para un } k = 2.$$

Los datos del certificado de calibración de masa son:

Valor nominal	error convencional	$U(k=2)$
2 kg	0,5 mg	6,0 mg

Del histórico de dicha pesa, se estima que la deriva desde la última calibración es menor de 2 mg. La densidad del aire durante su calibración fue de $1,096\text{ kg/m}^3$.

Las condiciones ambientales se miden con un termómetro, un higrómetro y un barómetro. Los valores registrados durante la calibración de masa se estima que tienen las siguientes incertidumbres típicas:

temperatura	2,5 °C
humedad relativa	7,5 %
presión	10 hPa

A continuación se especifican los datos de la calibración, el tratamiento de los mismos y los resultados obtenidos.

Toma y tratamiento de datos

Carga	Indicación I_p, I_m (g)	Indicación media \bar{I}_m (g) \bar{I}_p (g)	Diferencia indicaciones $\bar{I}_p - \bar{I}_m$ (g)
p	0,004		0,0080
m	0,013		
m	0,012	0,0125	
p	0,005	0,0045	
p	0,004		0,0080
m	0,013		
m	0,011	0,0120	
p	0,004	0,0040	
p	0,003		0,0085
m	0,012		
m	0,011	0,0115	
p	0,003	0,0030	
p	0,003		0,0090
m	0,011		
m	0,012	0,0115	
p	0,002	0,0025	
p	0,003		0,0075
m	0,012		
m	0,011	0,0115	
p	0,005	0,0040	
p	0,005		0,0070
m	0,012		
m	0,011	0,0115	
p	0,004	0,0045	

\bar{I} (mg)	8,00
$s(I)$ (mg)	0,707

Datos ambientales registrados durante la calibración de masa:

	inicial	final	media
Temperatura (°C)	18,5	19	
Humedad relativa (%)	50	55	
Presión (hPa)	1035	1030	
Densidad aire (kg/m ³)	1,232	1,223	1,228

La densidad del aire se ha calculado según la ecuación (31).

Para el cálculo de la masa de la muestra aplicamos la ecuación (1):

$$\begin{aligned} m_{\text{cm}} &= (m_{\text{cp}} + \delta m_{\text{cp}}) \cdot (1 + C) + \bar{I}_{\text{m-p}} + \delta d + \delta e = \\ &= (2000\ 000,5\ \text{mg} + 0)(1 - 2,073 \times 10^{-7}) + 8,00\ \text{mg} + 0 + 0 = 2000\ 008,09\ \text{mg} \end{aligned}$$

Incertidumbres

La incertidumbre asociada al error convencional de la pesa se obtiene aplicando la expresión (43), para un factor de cobertura $k=2$.

magnitud de entrada X_i	valor estimado	incertidumbre típica $u(x_i)$	coeficiente de sensibilidad $ c_i $	contribución a la incertidumbre $u_i(y)$
m_{cp}	2 000,000 5 g	$u(m_{cp})_c = \frac{U(m_{cp})_c}{k} = \frac{6}{2} = 3,00 \text{ mg}$	1	3,00 mg
δm_{cp}	0	$u(\delta m_{cp}) = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15 \text{ mg}$	1	1,15 mg
ρ_a	1,228 kg/m ³	$u(\rho_a) = 0,0123 \text{ kg/m}^3$	15,1 cm ³	0,19 mg
ρ_p	7 900 kg/m ³	$u(\rho_p) = \frac{U(\rho_p)}{k} = \frac{100}{2} = 50,0 \text{ kg/m}^3$	0,00258 cm ³	0,13 mg
ρ_m	8 400 kg/m ³	$u(\rho_m) = \frac{[400]}{\sqrt{12}} = 115 \text{ kg/m}^3$	0,00078 cm ³	0,09 mg
\bar{l}_{m-p}	8,00 mg	$\frac{0,707}{\sqrt{6}} = 0,289 \text{ mg}$	1	0,29 mg
δd	0	$\frac{1}{\sqrt{6}} = 0,408 \text{ mg}$	1	0,41 mg
δe	0	0	1	0

Incertidumbre combinada (u)	3,26 mg
Incertidumbre expandida (U)	6,52 mg

En aquellos casos en los que existen varias opciones se ha especificado la fórmula empleada en el cálculo de incertidumbres.

Como la incertidumbre obtenida en el ensayo es $6,5 \text{ mg} < \frac{m.e.p.}{3}$ podemos poner como incertidumbre asociada a la calibración un tercio de error máximo permitido redondeado:

$$U(m_{cm}) = 30 \text{ mg.}$$

Resultado de la calibración

Valor nominal	error convencional	$U(m_{cm}) (k=2)$
2 kg	8 mg	30 mg

La incertidumbre expandida de calibración corresponde a una incertidumbre típica multiplicada por un factor de cobertura $k=2$, que para una distribución normal corresponde a un nivel de confianza del 95,45 %.

Metrología

NIPO: 113-20-002-9