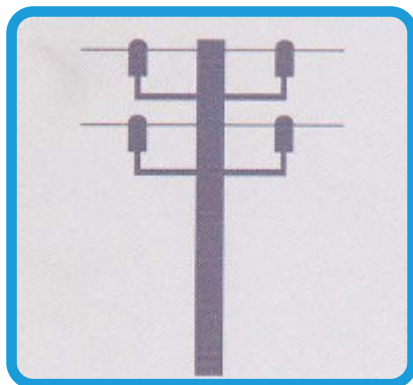
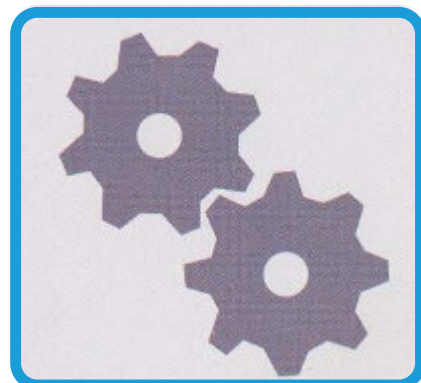
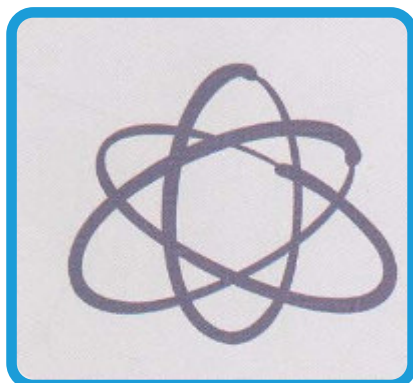
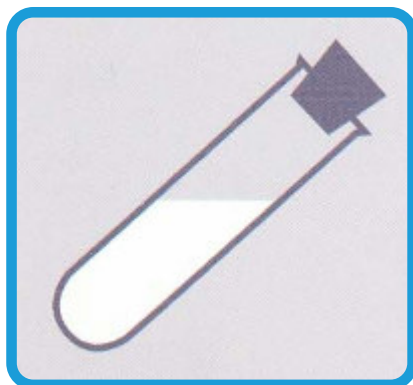
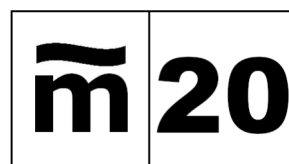


# Metrología



PROCEDIMIENTO ME-012 PARA LA  
DETERMINACIÓN DEL VALOR DE MASA



## PROCEDIMIENTO ME012

### DETERMINACIÓN DEL VALOR 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](http://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 patrón por sustitución para la determinación de su valor de masa y a partir de este determinar 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 1 000 kg, preferiblemente de clases E<sub>1</sub> y E<sub>2</sub> según la clasificación de la OIML R111-1 [9] pudiéndose aplicar también a clases inferiores, 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.

### Empuje del aire:

Fuerza ascendente que se opone a la fuerza debida al peso, ejercida sobre el cuerpo por el medio que le rodea. El empuje es función de la densidad del medio en el que se encuentra el cuerpo, del volumen del cuerpo y de la aceleración de la gravedad en el lugar donde se encuentra el cuerpo; según la ecuación:

$$E = -\rho \cdot V \cdot g \quad (1)$$

### 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 metrológicos 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<sup>-3</sup> que la equilibra en un aire de densidad 1,2 kg·m<sup>-3</sup> [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

$d$	resolución del instrumento.
$d_1$	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.
$e_{cm}$	error de masa convencional de la muestra.
$e_m$	error de masa de la muestra.
$e_p$	error de masa del patrón dado en su certificado de calibración.
$I_m$	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.

$\bar{I}_{m-p}$	valor medio de las diferencias de indicación entre el patrón y la muestra.
$I_p$	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.
$m_{cm}$	valor de masa convencional de la muestra.
$m.e.p$	máximo error permitido.
$m_m$	valor de masa de la muestra.
$m_n$	valor nominal.
$m_p$	valor de masa del patrón.
$r(\bar{I}_m; \bar{I}_p)$	coeficiente de correlación entre la indicación media de la muestra y del patrón.
$t$	temperatura en el momento de la calibración.
$t_0$	temperatura de referencia a la que se determinó el volumen, generalmente 20 °C.
$t(\nu_{eff})$	factor de Student para $\nu_{eff}$ grados de libertad.
$n$	número de ciclos.
$s(\bar{I}_{m-p})$	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 el instrumento bajo control estadístico a partir de un número grande de medidas.
$u(d)$	incertidumbre debida a la resolución del instrumento de pesaje.
$u(\delta e)$	componente de incertidumbre debida al error de excentricidad del instrumento de pesaje.
$u(\delta m_p)$	componente de incertidumbre debida a la deriva del patrón.
$u(e_m)$	incertidumbre combinada del error de masa de la muestra.
$u(e_p)$	incertidumbre combinada del error de masa del patrón.
$u(i)$	incertidumbre debida a la calibración del instrumento de pesaje, excepto la contribución de la resolución y de la excentricidad.
$u(\bar{I}_{m-p})$	incertidumbre debida a la media de las diferencias de indicación.
$u_A(\bar{I}_{m-p})$	componente de la incertidumbre de tipo A de la media de las diferencias de indicación.
$u_B(\bar{I}_{m-p})$	componente de la incertidumbre de tipo B de la media de las diferencias de indicación.
$u_B(\bar{I}_m)$	componente de la incertidumbre de tipo B de la media de las indicaciones de la muestra.

$u_B(\bar{I}_p)$	componente de la incertidumbre de tipo B de la media de las indicaciones del patrón.
$u(m_n)$	incertidumbre del valor nominal de una masa.
$u(m_p)$	incertidumbre combinada de la masa del patrón.
$u(m_m)$	incertidumbre combinada de la masa de la muestra.
$U(m_{cm})$	incertidumbre expandida de la masa convencional de la muestra.
$U(m_m)$	incertidumbre expandida de la masa de la muestra.
$U(m_p)$	incertidumbre expandida de la masa del patrón.
$u(\rho_m)$	incertidumbre combinada de la densidad de la muestra.
$u(\rho_a)$	incertidumbre combinada de la densidad del aire.
$U(\rho_m)$	incertidumbre expandida de la densidad de la muestra.
$u(V_m)$	incertidumbre combinada del volumen de la muestra.
$u(V_p)$	incertidumbre combinada del volumen del patrón.
$U(V_m)_f$	incertidumbre expandida del volumen de la muestra dado por el fabricante.
$U(t)$	incertidumbre expandida de la temperatura.
$U(t_d)$	incertidumbre expandida de la temperatura de rocío.
$U(p)$	incertidumbre expandida de la presión.
$V$	volumen de la muestra o del patrón a la temperatura $t$ en el momento de la calibración.
$V_m$	volumen de la muestra.
$V_o$	volumen de la muestra o del patrón a la temperatura de referencia.
$V_p$	volumen del patrón.
$\delta e$	error de excentricidad del instrumento de pesaje.
$\alpha$	coeficiente de dilatación lineal.
$\delta m_p$	deriva de la masa patrón.
$\rho_a$	densidad del aire.
$\rho'_a$	densidad del aire en el momento de la calibración del patrón.
$\rho_m$	densidad de la muestra.
$\rho_{m \text{ máx}}$	valor máximo del intervalo donde se espera encontrar la densidad de la muestra.
$\rho_{m \text{ mín}}$	valor mínimo del intervalo donde se espera encontrar la densidad de la muestra.
$\rho_o$	densidad de referencia del aire igual a $1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

$\rho_{ref}$	densidad de referencia igual a 8 000 kg·m <sup>-3</sup> .
$V_{eff}$	grados de libertad efectivos.
$V_i$	grados de libertad de cada componente de incertidumbre.

## 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.

Los requisitos metrológicos y características físicas de los patrones serán los especificados en OIML R 111-1 [4].

- 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.

- Equipos auxiliares

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

### 5.2. Operaciones previas

- a) Antes de realizar la calibración se tendrán en cuenta una serie de consideraciones generales: 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. En el caso en que se puedan confundir masas de distintos juegos, se anotará cualquier característica de su superficie que la identifique.



- b) Los patrones de masa utilizados serán pesas calibradas con el correspondiente certificado de calibración actualizado y 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).
- c) 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 Recomendación Internacional OIML R 111-1 [4] antes de comenzar la calibración, de modo que se puedan despreciar los efectos de convección.
- d) 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.
- e) 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.
- f) 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 la Recomendación Internacional OIML R 111-1 [4].
- g) 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.
- h) 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 el apartado C2.1 de la Recomendación Internacional OIML R111-1 [4]).
- i) 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 el valor de masa 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: temperatura del aire, temperatura del punto de rocío o humedad relativa y presión atmosférica, al menos, al inicio y al final de la calibración, siendo recomendable tomarlas en cada ciclo de medida.

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)

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

d.- Repetición del ciclo de medida  $n$  veces ( $n \geq 6$ ).

e.- Estimación del valor de masa  $y$ , a partir de éste, el 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, se observa que el valor de masa convencional de la muestra se sale de los máximos errores permitidos dados por la recomendación internacional OIML R111-1 [4] (véase el anexo II) para su clase de exactitud, si fuera posible, la pesa debería ajustarse y la calibración de masa se realiza después del ajuste. El ajuste de una pesa siempre se realizará con la autorización del cliente, y en el certificado de calibración deberán darse 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 de la muestra se determina mediante la ecuación:

$$m_m = m_p + \delta m_p + \rho_a(V_m - V_p) + \bar{I}_{m-p} + \delta e \quad (2)$$

- El valor de masa del patrón,  $m_p$  es el valor de masa en el momento de su calibración, dado en su certificado de calibración según la expresión:

$$m_p = m_n + e_p \quad (3)$$

Siendo  $m_n$  el valor nominal, y  $e_p$  el error real del patrón.

- La deriva del patrón desde su última calibración,  $\delta m_p$ , en general, no se evalúa para corregirlo, pero sí para la contribución a la incertidumbre.
- La densidad del aire se puede calcular a partir de la información dada en el Anexo I.

En el caso de tener valores de la densidad del aire al principio y al final de la calibración, se tomará un valor medio de ambos. Es preferible tomar las condiciones ambientales en cada ciclo, con el fin de corregir el empuje del aire ciclo a ciclo.

El volumen de la muestra puede obtenerse:

- De su Certificado de Calibración.
- Valores suministrados por el fabricante.
- De valores tabulados de la densidad en función del material. El volumen se calcula a partir del valor de la densidad tabulado mediante la expresión:

$$V_m = \frac{m_n}{\rho_m} \quad (4)$$

El volumen del patrón debe obtenerse de su Certificado de Calibración.

La posible dilatación de volumen, tanto en la muestra como en el patrón, debida a la variación de la temperatura durante la calibración, se considera despreciable en los intervalos marcados en el punto 5.2 apartado h).

Tanto para la muestra como para el patrón, si la calibración se realiza a una temperatura  $t$  distinta (fuera de los intervalos marcados en el punto 5.2 apartado h)) de la temperatura de referencia,  $t_0$ , a la que fue determinado el valor del

volumen dado en el certificado,  $V_0$ , habrá que aplicar la corrección por dilatación del volumen:

$$V = V_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0)] \quad (5)$$

Siendo  $\alpha$  el coeficiente de dilatación lineal.

- 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:

$$\bar{I}_{m-p} = \bar{I}_m - \bar{I}_p = \frac{\bar{I}_{m1} + \bar{I}_{m2}}{2} - \frac{\bar{I}_{p1} + \bar{I}_{p2}}{2} \quad (6)$$

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  $\bar{I}_{m-p}$ :

$$\bar{I}_{m-p} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{(m-p)i}}{n} \quad (7)$$

- La excentricidad del instrumento de pesaje,  $\delta e$ , 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.

La masa convencional de la muestra se calcula a partir de su masa mediante la expresión:

$$m_{cm} = m_m \frac{(1 - \rho_0/\rho_m)}{(1 - \rho_0/\rho_{ref})} \quad (8)$$

Siendo  $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$ , y  $\rho_{ref} = 8\,000 \text{ kg/m}^3$ .

## 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].

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a la ecuación (2) y considerando una correlación parcial entre  $m_p$  y  $V_p$ , se obtiene:

$$u^2(m_m) = u^2(m_p) + u^2(\delta m_p) + (V_m - V_p)^2 \cdot u^2(\rho_a) + (\rho_a - \rho'_a)^2 \cdot u^2(V_p) + \rho_a^2 \cdot u^2(V_m) + u^2(\bar{I}_{m-p}) + u^2(\delta e) \quad (9)$$

siendo  $\rho'_a$  la densidad del aire en el momento de la calibración del patrón.

A continuación, se indica cómo se calcula cada una de las incertidumbres típicas asociadas a las magnitudes de entrada de la ecuación (9):

- incertidumbre de la masa del patrón en el momento de la calibración,  $u(m_p)$ , se obtendrá de la incertidumbre dada en su certificado de calibración,  $U(m_p)$ , para el factor de cobertura correspondiente  $k$ .

$$u(m_p) = \frac{U(m_p)}{k} \quad (10)$$

- incertidumbre debida a la deriva del patrón,  $u(\delta m_p)$ , se puede calcular de la siguiente manera:
  - Partiendo del histórico de calibraciones sucesivas del patrón, se obtiene una variación de su masa,  $\delta m_p$ , 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 y conocimiento del patrón. La incertidumbre debida a la deriva será:

$$u(\delta m_p) = \frac{\delta m_p}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

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

$$u(\delta m_p) = \frac{U m_p}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

- En el caso de realizar la calibración con varios patrones que estén correlacionados, (por ejemplo, si han sido calibrados por el mismo laboratorio con el mismo instrumento o con los mismos patrones):

$$u(m_p) = \sum (u(m_p)_i) \quad (13)$$

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

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

- Incertidumbre debida al volumen de la muestra,  $u(V_m)$ .

Se pueden dar los siguientes casos:

- Que se pueda obtener de los valores de un Certificado de Calibración,  $U(V_m)$ , para el factor de cobertura correspondiente  $k$ .

$$u(V_m) = \frac{U(V_m)}{k} \quad (14)$$

- Que sea un dato suministrado por el fabricante,  $U(V_m)_f$ . En ese caso, si el fabricante no indica para qué factor de cobertura está dada dicha incertidumbre, se considerará una distribución rectangular:

$$u(V_m) = \frac{U(V_m)_f}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

- Que pueda ser obtenida a partir de valores tabulados de la densidad, en función del material. Si lo que tenemos es un intervalo donde se espera encontrar el valor de dicha densidad,  $[\rho_{m \text{ máx}}; \rho_{m \text{ mín}}]$ , el volumen se calcula a partir del valor de la densidad tabulado mediante la expresión:

$$V_m = \frac{m_m}{\rho_m} \quad (16)$$

a partir de ese intervalo se estimará la incertidumbre como:

$$u(\rho_m) = \frac{[\rho_{m \text{ máx}} - \rho_{m \text{ mín}}]}{\sqrt{12}} \quad (17)$$

siempre que se tome como valor de  $\rho_m$ :

$$\rho_m = \frac{\rho_{m \text{ máx}} + \rho_{m \text{ mín}}}{2} \quad (18)$$

y si no, se tomará el caso más desfavorable:

$$u(\rho_m) = \frac{[\rho_{m \text{ máx}} - \rho_{m \text{ mín}}]}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a la ecuación (16) y sabiendo que  $u(m_n) = 0$ , la incertidumbre del volumen es:

$$\frac{u(V_m)}{V_m} = \frac{u(\rho_m)}{\rho_m} \quad (20)$$

La incertidumbre debida a la dilatación del volumen, de la muestra o del patrón, por la variación de temperatura durante la calibración, se considera despreciable.

- Incertidumbre debida al volumen del patrón,  $u(V_p)$ .

Se debe obtener de los valores de un certificado de calibración,  $u(V_p)$ , para el factor de cobertura correspondiente  $k$ :

$$u(V_p) = \frac{U(V_p)}{k} \quad (21)$$

En la condición expuesta en el apartado 5.4.5, referente a la posible dilatación de volumen con la temperatura, se puede considerar:

$$u(V) \approx u(V_0) \quad (22)$$

pues el resto de los términos resultan despreciables.

La incertidumbre debida a la dilatación del volumen por la variación de temperatura se considera despreciable.

En el caso de realizar la calibración con varios patrones que estén correlacionados, (por ejemplo, si han sido calibrados por el mismo laboratorio con el mismo instrumento o con los mismos patrones):

$$u(V_p) = \sum (u(V_p)_i) \quad (23)$$

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

Analizaremos dos componentes de incertidumbre:

- Componente de incertidumbre tipo A.

$$u_A(\bar{I}_{m-p}) = \frac{s(I_{m-p})}{\sqrt{n}} \quad (24)$$

siendo

$$s(I_{m-p}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [I_{(m-p)_i} - \bar{I}_{m-p}]^2}{n-1}} \quad (25)$$

Puede también considerarse como componente de incertidumbre de tipo A, la obtenida mediante una estimación de una varianza,  $s_p^2$ , evaluada en el instrumento bajo control estadístico a partir 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:

$$u_A(\bar{I}_{m-p}) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \quad (26)$$

siempre y cuando  $s(I_{m-p}) \leq s_p$

- Componente de incertidumbre tipo B (debida al instrumento de pesaje)

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a las ecuaciones (6) y (7), según la Guía GUM [2], y considerando las variables  $\bar{I}_m$  y  $\bar{I}_p$  correlacionadas al estar tomadas con el mismo instrumento, la componente de incertidumbre de tipo B de  $\bar{I}_{m-p}$  será:

$$u_B^2(\bar{I}_{m-p}) = u_B^2(\bar{I}_m) + u_B^2(\bar{I}_p) - 2u_B(\bar{I}_m)u_B(\bar{I}_p) \cdot r(\bar{I}_m; \bar{I}_p) \quad (27)$$

Las incertidumbres  $u_B(\bar{I}_m)$  y  $u_B(\bar{I}_p)$  tienen, fundamentalmente, dos componentes, una debida a la resolución del instrumento,  $u(d)$ , y otra debida a los demás factores analizados en la calibración del instrumento  $u(i)$ . (Podrían considerarse otras componentes como las debidas a efectos térmicos o magnéticos sobre el instrumento, que consideramos despreciables puesto que son magnitudes de influencia que tratarán de minimizarse). La covarianza entre  $u_B(\bar{I}_m)$  y  $u_B(\bar{I}_p)$  hace doble la componente debida a la resolución del instrumento y anula la debida a las demás componentes de la calibración del instrumento. Por lo tanto podemos poner:

$$u_B^2(\bar{I}_{m-p}) = 2 \cdot u^2(d) \quad (28)$$

Para calcular  $u(d)$ , consideramos una distribución rectangular de amplitud  $d$ .



$$u(d) = \frac{d}{\sqrt{12}} \quad (29)$$

Luego:

$$u_B(\bar{I}_{m-p}) = \frac{d}{\sqrt{6}} \quad (30)$$

Haciendo una suma cuadrática de estas dos componentes, tenemos que la incertidumbre debida a la diferencia de indicación,  $u(\bar{I}_{m-p})$ , será:

$$u^2(\bar{I}_{m-p}) = \sqrt{u_A^2(\bar{I}_{m-p}) + u_B^2(\bar{I}_{m-p})} \quad (31)$$

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

$$u(\delta e) = \frac{\delta e}{\sqrt{12}} \quad (32)$$

siendo  $\delta e$  el error máximo de excentricidad cometido.

En algunos casos, (fundamentalmente en instrumentos de pesaje con plato receptor de carga grandes), puede determinarse el error de excentricidad mediante la proporción  $\delta e \cdot \left(\frac{d_1}{d_2}\right)$ , 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  $\delta e$ .

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

$$u(\delta e) = \frac{\frac{d_1}{d_2} \delta e}{\sqrt{12}} \quad (33)$$

Por tanto, en general, la ecuación (9) quedará:

$$u^2(m_m) = u^2(m_p) + u^2(\delta m_p) + (V_m - V_p)^2 \cdot u^2(\rho_a) + (\rho_a - \rho'_a)^2 \cdot u^2(V_p) + \rho_a^2 \cdot u^2(V_m) + \frac{s^2(I_{m-p})}{n} + \frac{(d)^2}{6} + \frac{(\delta e)^2}{12} \quad (34)$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres a la ecuación (3) tenemos:

$$u(e_m) = u(m_m) \quad (35)$$

pues la incertidumbre debida al valor nominal,  $u(m_n)$ , es nula por tratarse de un valor constante.

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 $u_i(y)$
$m_p$	$m_n + e_p$	$\frac{U(m_p)}{k}$	normal	1	$\frac{U(m_p)}{k}$
$\delta m_p$	0	$\frac{\delta m_p}{\sqrt{3}}$ o $\frac{U(m_p)}{\sqrt{3}}$	rectangular	1	$\frac{\delta m_p}{\sqrt{3}}$ o $\frac{U(m_p)}{\sqrt{3}}$
$\rho_a$	$\rho_a$	$U(\rho_a)$	normal	$V_m - V_p$	$V_m - V_p \cdot U(\rho_a)$
$V_p$	$V_p$ (certificado)	$\frac{U(V_p)}{k}$	normal	$(\rho_a - \rho'_a)$	$(\rho_a - \rho'_a) \cdot \frac{U(V_p)}{k}$
$V_m$	$V_m$ (certificado) o $V_f$ (fabricante) o $V_m = \frac{m_n}{\rho_m}$ (tabulado)	$\frac{U(V_m)}{k}$ o $\frac{U(V_m)_f}{\sqrt{3}}$ o $\frac{U(V_m)}{V_m} = \frac{u(\rho_m)}{\rho_m}$	normal o rectangular o rectangular	$\rho_a$	$\rho_a \cdot \frac{U(V_m)}{k}$ o $\rho_a \cdot \frac{U(V_m)_f}{\sqrt{3}}$ o $\rho_a \cdot V_m \cdot \frac{u(\rho_m)}{\rho_m}$
$\bar{I}_{m-p}$	$\frac{\sum_{i=1}^n I_{m-p}}{n}$	$\frac{s(I_{m-p})}{\sqrt{n}}$ o $\frac{s_p}{\sqrt{n}}$	normal	1	$\frac{s(I_{m-p})}{\sqrt{n}}$ o $\frac{s_p}{\sqrt{n}}$
		$\frac{d}{\sqrt{6}}$	rectangular	1	$\frac{d}{\sqrt{6}}$
$\delta e$	0	$\frac{\delta e}{\sqrt{12}}$	rectangular	1	$\frac{\delta e}{\sqrt{12}}$
Incertidumbre combinada					$u(m_m) = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
Incertidumbre expandida					$U(m_m) = k \cdot u(m_m)$

En el cálculo de la incertidumbre expandida:

$$U(m_m) = k \cdot u(m_m) \quad (36)$$

El valor del factor de cobertura  $k$  depende del tipo de distribución de probabilidad de  $u(m_m)$ . La distribución de  $u(m_m)$  resulta de la convolución de las distribuciones de probabilidad de todas sus contribuciones.

En buena aproximación se puede considerar que la distribución de  $u(m_m)$  sea normal, por tanto se considera  $k=2$  para un nivel de confianza del 95,45%.

Si se desea calcular el intervalo de confianza de forma más exhaustiva (aunque no se considera necesario), se puede tomar  $k = t(\mathcal{V}_{\text{eff}})$ . Siendo  $t(\mathcal{V}_{\text{eff}})$  el factor de Student dado en la tabla 2 para un nivel de confianza del 95,45%, basado en un número de grados de libertad efectivos,  $\mathcal{V}_{\text{eff}}$ , obtenidos a partir de la fórmula de Welch-Satterthwaite.

$$\frac{u^4(m_m)}{\mathcal{V}_{\text{eff}}} = \sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(m_m)}{\mathcal{V}_i} \quad (37)$$

La obtención de  $\mathcal{V}_{\text{eff}}$  implica conocer el número de grados de libertad  $\mathcal{V}_i$  de cada componente de la incertidumbre. Es probable que no se tengan los grados de libertad  $\mathcal{V}_i$  de muchos datos de entrada, en ese caso si dominan las contribuciones de incertidumbre tipo A, se considera  $\mathcal{V}_{\text{eff}} = n - 1$ . Si las contribuciones de incertidumbre tipo B son dominantes o del mismo orden a las de tipo A, habría que calcular  $\mathcal{V}_{\text{eff}}$  según la ecuación (37) con el siguiente criterio:

- Para una componente obtenida mediante evaluación Tipo A,  $\mathcal{V}_i = n - 1$ .
- Para una componente obtenida mediante evaluación Tipo B,  $\mathcal{V}_i = \infty$ .

$\mathcal{V}_{\text{eff}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	$\infty$
$t(\mathcal{V}_{\text{eff}})$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

La incertidumbre de calibración del valor convencional de masa, calculada aplicando la ley de propagación de incertidumbre a la ecuación (8), y considerando todas las variables independientes, puede considerarse igual a la incertidumbre del valor de masa, pues el resto de los términos resultan despreciables.

$$U(m_{\text{cm}}) \approx U(m_m) \quad (38)$$

## 6.2.- Interpretación de resultados

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

Según el criterio de la recomendación internacional OIML R111-1 [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 (anexo II).

El certificado de calibración especificará la masa y la masa convencional de las pesas calibradas preferentemente desglosada en valor nominal, error y en su caso 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  $E_1, E_2, F_1, F_2, M_1, M_{1-2}, M_2, M_{2-3}$  y  $M_3$ . 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
$\rho_a$	densidad del aire
$\chi_v$	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
$u(f)$	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:

$$\rho_a = p \cdot M_a \left[ 1 - \chi_v (1 - M_v / M_a) \right] / ZRT \quad (39)$$

Esta ecuación contiene una serie de parámetros que son considerados constantes  $R$ ,  $M_v$ ,  $M_a$  y otros,  $\chi_v$  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:  $\chi_v$

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

$$\chi_v = f(p, t_d) \cdot p_{sv}(t_d) \cdot p^{-1} \quad (40)$$

$$\chi_v = h \cdot f(p, t) \cdot p_{sv}(t) \cdot p^{-1} \quad (41)$$

$$p_{sv}(t) = \exp(AT^2 + BT + C + D/T) \text{ Pa} \quad (42)$$

$$p_{sv}(t_d) = \exp(AT_d^2 + BT_d + C + D/T_d) \text{ Pa} \quad (43)$$

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.

$$f(p, t) = \alpha + \beta_p + \gamma t^2 \quad (44)$$

$$f(p, t_d) = \alpha + \beta_p + \gamma t_d^2 \quad (45)$$

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:  $Z$

$$Z = 1 - pT^{-1} \left[ (a_0 + a_1t + a_2t^2) + (b_0 + b_1t)\chi_v + (c_0 + c_1t)\chi_v^2 \right] + p^2T^2 \left( d + e\chi_v^2 \right) \quad (46)$$

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 y teniendo en cuenta los parámetros descritos anteriormente, la densidad del aire puede calcularse con la expresión siguiente:

$$\rho_a = 3,483\,740 \times 10^{-3} \cdot \left( \frac{p}{ZT} \right) \cdot \left( 1 - 0,378\,0 \cdot \chi_v \right) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \quad (47)$$

Se asigna una incertidumbre típica relativa a dicha fórmula de  $u(f) = 10,3 \times 10^{-5}$

### **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**

$$\rho_a = \frac{0,34848 \cdot p - 0,009 \cdot h_r \cdot \exp(0,061 \cdot t)}{273,15 + t} \quad (48)$$

donde:

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

$t$ , es la temperatura en  $^\circ\text{C}$ .

$h_r$ , es la humedad relativa del aire en %.

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

### 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:

$$\rho_a = \rho_0 \cdot \left( -\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot h \right) \quad (49)$$

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:  $u_{(\text{formula})}/\rho_a < 1,2 \times 10^{-2}$

### 8.1.3.- Incertidumbre de la densidad del aire

De todas las contribuciones de incertidumbre es importante distinguir entre:

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

Aplicando pues la ley de propagación de varianzas:

$$\left[ \frac{u(\rho_a)}{\rho_a} \right]^2 = \left[ \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\delta \rho_a}{\delta p} \cdot u(p) \right]^2 + \left[ \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\delta \rho_a}{\delta t} \cdot u(t) \right]^2 + \left[ \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\delta \rho_a}{\delta t_d} \cdot u(t_d) \right]^2 + u^2(f) \quad (50)$$

o bien:

$$\left[ \frac{u(\rho_a)}{\rho_a} \right]^2 = \left[ \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\delta \rho_a}{\delta p} \cdot u(p) \right]^2 + \left[ \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\delta \rho_a}{\delta t} \cdot u(t) \right]^2 + \left[ \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\delta \rho_a}{\delta h} \cdot u(h) \right]^2 + u^2(f) \quad (51)$$

Se consideran los siguientes valores dados en [6]:

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

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

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

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

Los valores  $u(t)$ ,  $u(p)$  y  $u(t_d)$  dependen 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 <sub>1</sub>	Clase E <sub>2</sub>	Clase F <sub>1</sub>	Clase F <sub>2</sub>	Clase M <sub>1</sub>	Clase M <sub>1-2</sub>	Clase M <sub>2</sub>	Clase M <sub>2-3</sub>	Clase M <sub>3</sub>
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 10 kg de clase de exactitud  $E_2$ , por comparación directa, en un comparador de masa, con un patrón de exactitud  $E_1$  e igual valor nominal y realizado utilizando el método de sustitución.

El comparador de masa tiene una resolución de 10  $\mu\text{g}$ .

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 del comparador siguiendo la secuencia p-m-m-p.

El material de la muestra es acero inoxidable y el volumen y su densidad se obtienen de su certificado de calibración

$m_n$	$V_m$	$U(V_m) (k = 2)$	$\rho_m$	$U(\rho_m) (k = 2)$
10 kg	1 243,6 $\text{cm}^3$	0,6 $\text{cm}^3$	8 041 $\text{kg}/\text{m}^3$	3,5 $\text{kg}/\text{m}^3$

El material del patrón es acero inoxidable y sus datos son obtenidos de su certificado de calibración.

$m_n$	$e_p$	$U(e_p) (k = 2)$	$V_p$	$U(V_p) (k = 2)$
10 kg	-6,1 mg	0,72 mg	1 242.4 $\text{cm}^3$	0,6 $\text{cm}^3$

La temperatura se mide con una incertidumbre  $U(t) = 0,10 \text{ }^\circ\text{C} (k = 1)$ ; la temperatura de rocío se mide con un higrómetro de incertidumbre  $U(t_d) = 0,65 \text{ }^\circ\text{C} (k = 1)$ ; y la presión se mide con un barómetro con una incertidumbre  $U(p) = 6,5 \text{ Pa} (k = 1)$

**Toma y tratamiento de datos**

Carga	Indicación $I_p, I_m$ (mg)	Indicación media $\bar{I}_m$ (mg) $\bar{I}_p$ (mg)	Diferencia indicaciones $\bar{I}_m - \bar{I}_p$ (mg)
p	-0,11		
m	-3,84		
m	-3,84	-3,84	
p	-0,16	-0,14	-3,71
p	-0,17		
m	-3,87		
m	-3,88	-3,88	
p	-0,18	-0,18	-3,70
p	-0,19		
m	-3,92		
m	-3,93	-3,93	
p	-0,23	-0,21	-3,72
p	-0,24		
m	-3,96		
m	-3,97	-3,97	
p	-0,27	-0,26	-3,71
p	-0,28		
m	-3,99		
m	-4,00	-4,00	
p	-0,30	-0,29	-3,71
p	-0,31		
m	-4,03		
m	-4,04	-4,04	
p	-0,34	-0,33	-3,71

$\bar{I}$ (mg)	-3,71
$s(I)$ (mg)	0,005

Datos ambientales	Inicial	final	media	incertidumbre
Temperatura (°C)	20,05	20,05		
Temp. pto. rocío (°C)	12,86	12,85		
Presión (mbar)	937,730	937,440		
Densidad aire (kg/m <sup>3</sup> )	1,1079	1,1078	1,1078	0,0006

$m_m = m_n + e_{cm}$	$m_{cm} = m_n + e_{cm}$
10 kg - 8,5 mg	10 kg - 0,8 mg

La densidad del aire se ha calculado según la ecuación (47), su incertidumbre según la ecuación (50),  $m_m$  según la ecuación (2) y  $m_{cm}$  según la ecuación (8).

### Incertidumbres

La incertidumbre asociada a la masa se obtiene a partir de la expresión (39), para un factor de cobertura  $k=2$ :

magnitud de entrada $X_i$	valor estimado de $X_i$	incertidumbre típica $u(x_i)$	coeficiente de sensibilidad $c_i$	contribución a la incertidumbre $u_i(y)$ (mg)	
$m_p$	10 kg - 6,1 mg	$\frac{U(m_p)}{k} = 0,36$ mg	1	0,36	0,33
$\delta m_p$	0	$\frac{U(m_p)}{\sqrt{3}} = 0,42$ mg	1	0,42	
$\rho_a$	1,0834 kg / m <sup>3</sup>	$\rho_a \frac{u(\rho_a)}{\rho_a} =$ $\rho_a 5 \times 10^{-4} =$ 0,000 6 kg/m <sup>3</sup>	1,2 cm <sup>3</sup>	0,0007	0,33
$V_p$	1 242,4 cm <sup>3</sup>	$\frac{U(V_p)}{k} = 0,3$ cm <sup>3</sup>	0	0	
$V_m$	1 243,6 cm <sup>3</sup>	$\frac{U(V_p)}{k} = 0,3$ cm <sup>3</sup>	1,1077 kg/ m <sup>3</sup>	0,33	
$\bar{I}_{m-p}$	-3,71 mg	$\frac{s(I)}{\sqrt{n}} = 0,002$ mg	1	0,002	0,005
		$\frac{d}{\sqrt{6}} = 0,004$ mg	1	0,004	
	0	0	1	0	

Incert. combinada $u(m_m)$	0,64 mg
Incert. expandida $U(m_m)$	1,3 mg

Se ha especificado la fórmula empleada en el cálculo de incertidumbres, con el fin de aclarar, en aquellos casos en los que existen varias opciones.

Según la recomendación internacional OIML R 111 la incertidumbre obtenida en la calibración tiene que ser menor que  $\frac{m.e.p}{3}$  para ese valor nominal y esa clase de exactitud:

$$1,3 < \frac{m.e.p}{3} = \frac{15}{3} = 5 \text{ mg}$$

condición que en este caso se cumple. (En este caso podría ponerse como incertidumbre asociada al resultado de la calibración 5 mg).

Puede considerarse que  $U(m_{cm}) \approx U(m_{cm}) \approx U(m_m) = 1,3$  mg.

### Resultado de la calibración

$m_n$	$e_m$	$U(m_m) (k = 2)$	$e$	$U(m_{cm}) (k = 2)$
10 kg	-8,5 mg	1,3 mg	-0,8 mg	1,3 mg

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



# Metrología

NIPO: 113-20-002-9