

Bogotá 2024-11-05
Código INM/GTM MR M / 01
Versión 2

Guía para la **calibración de pesas** clase E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3





CONTENIDO

1. OBJETIVO	6
2. ALCANCE	6
3. ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS	6
4. DEFINICIONES.....	8
5. GENERALIDADES.....	10
6. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES	12
6.1. Método de calibración	12
6.2 Equipos y materiales	12
6.3. Condiciones ambientales	17
6.4. Proceso de calibración.....	17
6.4.1 Operaciones previas.....	17
6.4.2 Proceso de calibración.....	18
6.4.2.1 Método ABBA	19
6.4.2.2 Método ABA	19
6.4.2.3 Método $A_1B_1...B_nA_2$	20
6.4.3 Tratamiento de datos y resultados.....	20
6.5 Evaluación de la incertidumbre de medición.....	22
6.5.1. Fuentes de incertidumbre de medición	22
6.5.1.1 Evaluación de la incertidumbre de la masa	23
6.5.1.2 Incertidumbre estándar combinada de la masa	27
6.5.1.2 Incertidumbre estándar combinada de la masa convencional.....	27
6.5.2. Incertidumbre expandida de medición.....	27
6.6. Aseguramiento de la validez de los resultados.....	28
6.7. Presentación de los resultados	28
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
8. ANEXOS.....	30

Guía para la calibración de pesas

clase E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3



Guía para la calibración de pesas clase E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 Y M3 Versión 2 / Jhon Jaiver Escobar Soto [y otros dos] -- Bogotá, (Colombia): Instituto Nacional de Metrología, 2025.

37 páginas.

Incluye referencias bibliográficas, tablas y fotos

ISBN e-Book: 978-628-95752-9-3.

1. Método de calibración 2 Equipos y materiales 3. Condiciones ambientales 4. Proceso de calibración 5 Evaluación de la incertidumbre de medición 6. Aseguramiento de la validez de los resultados 7. Presentación de los resultados (Colombia).

U.A.E. Instituto Nacional De Metrología (978-628-95752)

Instituto Nacional de Metrología - INM
Av. Carrera 50 No. 26-55 Int 2, Bogotá
Código Postal: 111321 - Colombia

Esta guía es el resultado del trabajo conjunto entre el Instituto Nacional de Metrología de Colombia - INM, miembros de la Red Colombiana de Metrología - RCM (Grupos de Trabajo por Magnitud) y el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC con el fin armonizar métodos de calibración y propender por la uniformidad y coherencia en criterios técnicos mínimos a emplear por los laboratorios de calibración y usuarios de estos métodos. Esta guía presenta metodologías reconocidas internacionalmente y se ha elaborado recogiendo el conocimiento y la experiencia de los miembros del equipo de trabajo, de tal forma que pueda ser usada como base para la elaboración de procedimientos e instructivos prácticos por parte de los laboratorios de calibración y ensayo.

En este sentido lo consignado en esta guía se constituye en un referente para:

a. El Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC. b. Los laboratorios de calibración y ensayo que involucren los métodos o criterios técnicos consignados en esta guía. c. Los laboratorios internos de las organizaciones o fabricantes que requieran el uso de estos métodos de calibración o criterios técnicos.

Fecha de recepción: 2024-10-30
Fecha de evaluación: 2024-11-06
Fecha de aceptación: 2024-11-08

Preparación editorial

U.A.E. Instituto Nacional de Metrología
(978-628-95752)

Edición:

Instituto Nacional de Metrología - INM. Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC.
Laboratorios de calibración.

Corrección de estilo:

Instituto Nacional de Metrología - INM.
Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC.
Laboratorios de calibración.

Diagramación:

Instituto Nacional de Metrología - INM. Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC.

Línea de atención al cliente: +57 (601) 254 2222.
Línea Nacional: 01 8000112542.
contacto@inm.gov.co
www.inm.gov.co

Citación sugerida:

Barreto Gutiérrez, J. A., Cifuentes Díaz, D. V., & Escobar Soto, J. J. (2022). Guía para la calibración de pesas clase E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 Y M3 Versión 2. Instituto Nacional de Metrología.

Publicado en Bogotá, Colombia, agosto de 2025.



Contenido

1. OBJETIVO	6
2. ALCANCE	6
3. ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS	6
4. DEFINICIONES	8
5. GENERALIDADES	10
6. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES	12
6.1. Método de calibración	12
6.2 Equipos y materiales	12
6.3. Condiciones ambientales	17
6.4. Proceso de calibración.....	17
6.4.1 Operaciones previas.....	17
6.4.2 Proceso de calibración	18
6.4.2.1 Método ABBA	19
6.4.2.2 Método ABA	19
6.4.2.3 Método $A_1B_1...B_nA_2$	20
6.4.3 Tratamiento de datos y resultados.....	20
6.5 Evaluación de la incertidumbre de medición.....	22
6.5.1. Fuentes de incertidumbre de medición	22
6.5.1.1 Evaluación de la incertidumbre de la masa	23
6.5.1.2 Incertidumbre estándar combinada de la masa	27
6.5.1.2 Incertidumbre estándar combinada de la masa convencional.....	27
6.5.2. Incertidumbre expandida de medición	27
6.6. Aseguramiento de la validez de los resultados.....	28
6.7. Presentación de los resultados	28
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
8. ANEXOS.....	30



EQUIPO DE TRABAJO

Este documento fue elaborado en el espacio del Grupo Técnico por Magnitud de Masa de la Red Colombiana de Metrología. Para el desarrollo de la versión 2 del documento se contó con la participación del Instituto Nacional de Metrología de Colombia - INM (Subdirección de Metrología Física, Laboratorio de Masa: Jhon Escobar Soto, Jhon Alexander Barreto Gutiérrez, Diana Vanessa Cifuentes Díaz, Dumar Andrés Ospina Morales, Luis Fernando Lagos Torres), el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC y los laboratorios de calibración que han desarrollado la magnitud relacionada y que han participado en las reuniones del grupo técnico.

REVISIÓN

Mesa de Trabajo Técnico Científico de la Subdirección de Física.

AGRADECIMIENTOS

La ingeniera Yineth Paola Ochoa Fonseca, durante su estancia en el laboratorio de masa, fue fundamental en la construcción del presente documento. Para ella, un agradecimiento y un reconocimiento a su trabajo en el INM.



1. OBJETIVO

Establecer el procedimiento para la calibración de pesas normalizadas tipo OIML en el intervalo de 1 mg a 5 000 kg mediante el método de comparación directa ABBA, ABA o AB₁...B_nA, con el fin de estimar su valor de masa y, a partir de éste, calcular su valor de masa convencional.

2. ALCANCE

Esta guía aplica para la calibración de pesas de clases de exactitud E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ y M₃ acordes a la Norma Técnica Colombiana NTC 1848 [1] mediante la aplicación del método de comparación directa ABBA, ABA o AB₁...B_nA, y el uso de un patrón (o patrones) de referencia con una masa de igual valor nominal¹.

Esta guía se aplica si la densidad del aire desvía del valor de referencia (1.2 kg/m³) en más del 10%, de lo contrario se debe tener en cuenta lo establecido en la norma NTC 1848 [1].

3. ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS

Símbolo	Definición
b	Empuje del aire
d	Resolución del instrumento
δm_{ct}	Desviación en masa convencional de la pesa de prueba
δm_t	Desviación en masa de la pesa de prueba
$\vec{F}$	Fuerza
$\vec{F}_g$	Fuerza gravitacional
$\vec{g}$	Aceleración local de caída libre
k	Factor de cobertura

¹ En el contexto colombiano, los métodos de comparación directa son conocidos como: doble sustitución para el esquema de pesaje ABBA, y sustitución simple para los esquemas de pesaje ABA y AB₁...B_nA.



Símbolo	Definición
$\vec{K}$	Constante de proporcionalidad aproximada a la aceleración local de caída libre
I_r	Indicación del instrumento de pesaje al colocar la pesa de referencia
I_t	Indicación del instrumento de pesaje al colocar la pesa de prueba
ΔI_i	Diferencia entre la indicación de la prueba y la referencia en el ciclo i
$\overline{\Delta m}$	Valor medio de las diferencias de indicación entre la pesa de prueba y la pesa de referencia
EMP	Error máximo permitido
EMP_r	Error máximo permitido de la pesa de referencia
EMP_t	Error máximo permitido de la pesa de prueba
m	Masa de una pesa
m_{ct}	Valor de masa convencional de la pesa de prueba
m_N	Valor nominal de una pesa
m_r	Valor de masa de la pesa de referencia
m_t	Valor de masa de la pesa de prueba
n	Número de ciclos
$s(\overline{\Delta m})$	Desviación estándar de las diferencias de indicación entre la referencia y la muestra para un número n de ciclos
u_d	Incertidumbre debida a la resolución del instrumento de pesaje
$u_c(m_{ct})$	Incertidumbre estándar combinada de la masa convencional de la pesa de prueba
$u(m_r)$	Incertidumbre estándar combinada de la masa de referencia
$u_c(m_t)$	Incertidumbre estándar combinada de la masa de prueba
$U(m_{cp})$	Incertidumbre expandida de la masa convencional de la prueba
$U(m_r)$	Incertidumbre expandida de la masa de la referencia



Símbolo	Definición
$U(m_{ct})$	Incertidumbre expandida de la masa convencional de prueba
$u(V_t)$	Incertidumbre estándar del volumen de la pesa de prueba
$u(V_r)$	Incertidumbre estándar del volumen de la pesa de referencia
$U(V_r)$	Incertidumbre expandida del volumen de la pesa de referencia
$U(V_t)$	Incertidumbre expandida del volumen de la pesa de prueba
$u_w(\Delta \bar{m})$	Componente de incertidumbre de las diferencias de indicación
$u(\rho_a)$	Incertidumbre estándar de la densidad del aire
$u(\rho_t)$	Incertidumbre estándar de la densidad de la pesa de prueba
$u_{inst}(m_r)$	Componente de incertidumbre debida a la deriva de la pesa de referencia
V	Volumen
V_r	Volumen del patrón de referencia
V_t	Volumen de la pesa de prueba
θ_c	Unidades de lectura de la balanza
ρ_a	Densidad del aire durante la calibración
ρ_0	Densidad de referencia para el aire igual a $1.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_t	Densidad de la pesa de prueba
ρ_r	Densidad de la pesa de referencia
ρ_{ref}	Densidad de referencia igual a $8\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

4. DEFINICIONES

INSTRUMENTO DE PESAJE: Instrumento de medición usado para determinar la masa de un objeto, generalmente mediante la medición de la fuerza ejercida por la muestra sobre el platillo del instrumento debido a la acción del campo gravitatorio terrestre. De esta forma, un instrumento de pesaje también puede ser usado para medir fuerza. Los instrumentos de pesaje se pueden clasificar en



base al principio de medición, clase de exactitud o forma de trabajo, entre otros [2].

PESO: Fuerza definida como el producto de la masa de un objeto y el valor local de la aceleración de caída libre $\vec{g}$. La magnitud de este vector no es constante debido a factores como: variaciones en la distancia de diferentes puntos ubicados sobre la superficie terrestre con respecto al centro de masa de la Tierra, variaciones con respecto a la latitud terrestre, variaciones locales en la densidad terrestre y fuerzas de marea.

EMPUJE DEL AIRE: Fuerza que se contrapone al peso para un cuerpo que está rodeado de aire. Dado que la fuerza de empuje del aire ejercida sobre un objeto que está involucrado en un proceso de pesaje no puede ser medida de forma separada por un instrumento de pesaje, la indicación de éste se ve afectada por dicha fuerza.

CALIBRACIÓN: Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación [5].

CLASE DE EXACTITUD DE LAS PESAS: Clase de pesas que satisface determinados requisitos metrológicos que tienen como objetivo mantener los errores dentro de límites especificados.

DENSIDAD: La densidad de un cuerpo es el cociente entre la masa y su volumen.

MASA DE REFERENCIA: Masa o conjunto de masas utilizadas como referencia para determinar la masa de una u otras masas (pruebas) o en la calibración de instrumentos para pesar de funcionamiento no automático.

MASA DE PRUEBA: masa objeto de la calibración.

PESA: Medida materializada de masa, regulada de acuerdo con sus características físicas y metrológicas: forma, dimensiones, material, calidad de la superficie, valor nominal y error máximo permitido [1].

PESA ADICIONAL: Pesa de valor nominal de masa pequeña comparada con la de la muestra y empleada para reducir las diferencias de indicación entre el patrón y la muestra. Se pueden colocar pesas adicionales tanto en el patrón, como en la muestra.



VALOR CONVENCIONAL DE MASA: Valor convencional del resultado de pesaje en aire. Para una pesa a una temperatura de referencia de 20 °C, la masa convencional es la masa de una pesa de referencia de densidad 8 000 kg m⁻³ que se equilibra en un aire de densidad de referencia de 1.2 kg m⁻³ [3].

5. GENERALIDADES

El principio físico del método usado en la determinación de la masa consiste en comparar la fuerza gravitacional ($\vec{F}_1$) que ejerce sobre el plato receptor de carga de un instrumento de pesaje una masa de prueba (objeto de calibración) con la fuerza ejercida en el mismo sentido por una masa de valor conocido (referencia) del mismo valor nominal. En dicha comparación intervienen otras fuerzas (ver figura 1) asociadas al empuje del aire ($\vec{F}_2$) y al conjunto de interacciones eléctricas, magnéticas o de cualquier otro origen que se creen en la masa por causas diversas; los valores numéricos de estas interacciones son, generalmente, de varios órdenes de magnitud menores a $\vec{F}_1$ y $\vec{F}_2$, por lo que se pueden despreciar en las calibraciones habituales, salvo en las calibraciones de más alta exactitud o siempre y cuando se tenga la certeza de que su orden de magnitud no es despreciable.



Figura 1. Diagrama de cuerpo libre en un proceso de pesaje

La fuerza de influencia más significativa y que en la mayoría de los casos no es despreciable es la debida al empuje del aire ($\vec{F}_2$), la cual está en función del volumen de la pesa y de la densidad del aire.

El equilibrio mecánico en un proceso de pesaje se logra cuando actúan sobre el cuerpo las fuerzas $\vec{F}_1$ (peso), $\vec{F}_2$ (empuje del aire) y $\vec{F}_3$ (fuerza de reacción normal del platillo de la balanza), según muestra la Figura 1.

La ecuación de equilibrio se describe de la siguiente manera:

$$\vec{F}_3 = \vec{F}_1 - \vec{F}_2 \quad (1)$$



Donde,

$$\vec{F}_1 = m\vec{g} \quad (2)$$

$$\vec{F}_2 = \rho_a V \vec{g} \quad (3)$$

$$\vec{F}_3 = \vec{K} \theta_c \quad (4)$$

En la ecuación (4), $\vec{K}$ es una constante de proporcionalidad que representa el valor de la aceleración local de caída libre en el lugar de ubicación del instrumento de calibración, luego es posible suponer que $\vec{K} \cong \vec{g}$; y el término θ_c es la respuesta del instrumento de pesaje en unidades de su división de escala. Cuando no es determinada su sensibilidad, estos valores se consideran de forma razonable como unidades de masa.

Sustituyendo las expresiones para las fuerzas (ecuaciones 2, 3 y 4) en la ecuación (1) se obtiene:

$$(m - \rho_a V) = I \quad (5)$$

La ecuación (5) constituye la ecuación básica de un proceso de pesada.

Si se aplica la ecuación (5) en un proceso de calibración en donde I_t e I_r representan la indicación del instrumento de pesaje cuando es colocada la masa de prueba y la masa de referencia, se obtiene:

$$(m_t - \rho_{at} V_t) = I_t \quad (6)$$

$$(m_r - \rho_{ar} V_r) = I_r \quad (7)$$

En esta ecuación ρ_{at} representa la densidad del aire cuando es colocada la masa de prueba y ρ_{ar} es la densidad del aire cuando se mide la masa de referencia. Para efectos prácticos se considera que estos valores son iguales, luego $\rho_{at} = \rho_{ar} = \rho_a$. En un proceso de calibración, en donde la diferencia de indicación entre la masa de prueba y la masa de referencia es $\Delta I = I_t - I_r$, las ecuaciones (6) y (7) se reescriben como:

$$m_t - \rho_a V_t - (m_r - \rho_a V_r) = I_t - I_r \quad (8)$$

$$m_t = \Delta I + m_r + \rho_a (V_t - V_r) \quad (9)$$



El lado izquierdo de la ecuación (9) representa el valor de la masa de la pesa bajo calibración, m_r es la masa del patrón de referencia, y el término $\rho_a(V_t - V_r)$ está asociado a la corrección por empuje del aire [4].

6. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

6.1. Método de calibración

Para la calibración de masas se sigue el método de comparación directa en el que se comparan dos masas de igual valor nominal. Una de ellas hace de referencia (se identificará de ahora en adelante con la letra A) y otra de prueba (se identificará de ahora en adelante con la letra B), con el fin de estimar el valor desconocido de la masa de prueba, partiendo del valor de referencia. Las secuencias para seguir son distintas según la clase de exactitud de las masas bajo calibración o el número de masas a calibrar; en todas, se coloca de forma correlativa las masas A y B sobre el plato del instrumento de pesaje de manera que minimice posibles errores de deriva a lo largo del ciclo.

Los ciclos de comparación directa por doble sustitución ABBA y comparación directa por sustitución simple ABA son usados frecuentemente en la calibración de patrones de masa clase E y F; el ciclo de comparación directa de varios patrones de masa con el mismo valor nominal con una pesa de referencia $AB_1...B_nA$, es una variación del método ABA usado frecuentemente en la calibración de patrones de masa clase M, no se recomienda su uso en calibración de pesas clase E y F.

6.2 Equipos y materiales

- Patrones de masa (referencia)

Los patrones de masa utilizados como referencia deberían estar calibrados por el INM o por laboratorios acreditados por el Organismo Nacional de Acreditación ONAC (si operan en territorio colombiano), o por otros organismos de acreditación firmantes de Acuerdos de Reconocimiento Mutuo multilaterales (MRA) con ILAC o IAAC, que tengan incorporado dentro de su alcance de acreditación la capacidad de medición y calibración para la magnitud masa y deberían contar con el certificado de calibración vigente, teniendo en cuenta los periodos de calibración establecidos por el laboratorio para cada uno de ellos. Se espera que el cambio en el valor de masa para un patrón de referencia en función del tiempo (deriva) no sea mayor que la incertidumbre asociada a dicho patrón.



Las pesas usadas como referencia debería ser al menos una clase de exactitud superior que las pesas a calibrar, esto es, que el error máximo permitido de la pesa de referencia sea menor o igual a un tercio del error máximo permitido de la pesa a calibrar, luego:

$$EMP_r \leq \frac{1}{3} EMP_t \quad (10)$$

Los patrones de masa, debido a sus características físicas y metrológicas, requieren unas condiciones especiales para su manipulación. A continuación, se presentan algunas recomendaciones para asegurar y mantener adecuadamente un patrón de masa:

- No manipular las pesas con las manos desnudas, aunque las manos estén limpias el sudor natural mancha las pesas; el roce accidental con las manos también puede alterar las pesas.
- Preferiblemente, tomar las pesas con accesorios diseñados para tal fin, tales como pinzas u horquillas. Si es necesario manipular las pesas con la mano, colocarse guantes libres de polvo que impidan el traspaso de la sudoración de las manos a las pesas (látex, nitrilo entre otros), y sobre estos los guantes de algodón o hilo.
- Para manipular pesas de geometría paralelepípedo clase M y mayores a 5 kg, se recomienda utilizar guantes de cuero suave aun cuando se requiera el uso de instrumentos auxiliares tales como montacargas, grúas para izaje o eslingas, entre otros.
- No agregar etiquetas o adhesivos en la superficie de las pesas para su identificación, esta debe ir en su caja, estuche o en el lugar de almacenamiento. Para la identificación de pesas de geometría paralelepípedo clase M y mayores a 5 kg, se recomienda seguir las indicaciones establecidas en el numeral 13.6 de la norma NTC 1848, asegurando que ésta sea unívoca e indeleble.
- Colocar las pesas sobre superficies secas y de textura suave, pueden ser bandejas metálicas, vidrio o madera y sobre láminas de papel de filtro o papel blanco sin ningún tipo de impresión.



- Preferiblemente, mantener las pesas dentro de campanas de vidrio o en sus respectivos estuches. No es recomendable dejar las pesas expuestas al medio ambiente.
- Las pesas de geometría paralelepípedo clase M y mayores a 5 kg no requieren un estuche para su almacenamiento, no obstante, es necesario asegurar que son ubicadas en un lugar libre de polvo, humedad excesiva, y fuera del alcance de personal no autorizado para su manipulación. Se recomienda no apilar las pesas al momento de su almacenamiento, o tomar todas las precauciones necesarias en caso de que esto sea absolutamente necesario.
- En caso de prestar el servicio de limpieza y ajuste de patrones de masa, es necesario contar con un área independiente para realizar dicho proceso, y asegurar que el área de calibración esté libre de contaminación cruzada.
- Para realizar el proceso de limpieza, se recomienda usar diferentes paños de tela suave y preferiblemente de color blanco (sin ningún tipo de tinturas), y líquidos no abrasivos como soluciones de alcohol o agua destilada.
- Luego de la limpieza se da un tiempo prudente de estabilización de la pesa antes de su uso. Los tiempos recomendados están establecidos en la norma NTC 1848 [1] y se presentan en la Tabla 1.

○ **Tabla 1.** Tiempos de estabilización de las pesas después de limpieza.

Clase de exactitud	E ₁	E ₂	F ₁	F ₂ a M ₃
Después de limpieza con alcohol	7 a 10 días	3 a 6 días	1 a 2 días	1 hora
Después de limpieza con agua destilada	4 a 6 días	2 a 3 días	1 día	1 hora

- Se debería instruir a todo el personal sobre la características físicas y metrológicas de las pesas, dado que éstas materializan una masa patrón. Solamente el personal entrenado del laboratorio puede manipular las pesas.



- Instrumentos de pesaje

Los instrumentos de pesaje, en el contexto de la calibración de patrones de masa, son usados como dispositivos de transferencia², luego no es necesario que estén calibrados. No obstante, para el aseguramiento de la validez de las mediciones, es necesario tener en cuenta una serie de aspectos, a saber:

- El instrumento de pesaje debería estar ubicado en un lugar estable que permita minimizar las vibraciones, y que esté reservado solamente para éste. Además, deberían evitarse corrientes de aire, fuentes de calor o fuentes electromagnéticas, dado que todas estas variables pueden afectar el resultado de una calibración.
- Se debería asegurar que el instrumento de pesaje esté nivelado antes de su uso.
- Se recomienda usar una mesa auxiliar para colocar los patrones de masa y registrar los datos.
- Se recomienda seguir las indicaciones del fabricante relacionadas con el tiempo de encendido de los instrumentos de pesaje antes de su uso.
- Aunque no es necesaria la calibración de estos instrumentos, el laboratorio debería implementar y documentar un método sistemático que permita asegurar la validez de las mediciones realizadas con el instrumento de pesaje, y tomar decisiones como mantenimiento o reemplazo del equipo en caso de que sea pertinente. En el numeral 6.7 de este documento se presentan algunas herramientas estadísticas que permiten realizar estas acciones.

Para asegurar que el instrumento de pesaje es idóneo para lograr las Capacidades de Medición y Calibración esperadas por un laboratorio de calibración, se recomienda que la resolución del instrumento d cumpla la siguiente condición [6],

² Un dispositivo de transferencia se define como un “dispositivo utilizado como intermediario para comparar patrones de medida. Nota: Algunas veces, los propios patrones se utilizan como dispositivos de transferencia”. Ver [5].



$$d \leq \frac{EMP_t}{10} \quad (11)$$

- Instrumentos para medición de condiciones ambientales

Se usan los instrumentos de medición de condiciones ambientales del laboratorio destinados a esta actividad para las magnitudes temperatura, presión y humedad relativa (o bien temperatura de punto de rocío), las cuales son necesarias para la determinación de la densidad del aire.

Dado que el cálculo de la densidad del aire es fundamental en la calibración de patrones de masa, los instrumentos de medición de condiciones ambientales deberían estar calibrados por el INM o por un laboratorio acreditado por el Organismo Nacional de Acreditación ONAC u otro organismo de acreditación firmante de Acuerdos de Reconocimiento Mutuo.

- Accesorios adicionales

Dentro de los accesorios que se requieren para asegurar el éxito en un proceso de calibración, se tienen:

- Pinzas para manipulación de pesas.
- Guantes para manipulación de pesas según lo descrito en este numeral.
- Bayetilla para limpieza, fabricados en tela suave.
- Bayetilla, papel filtro o papel blanco (sin impresiones) para colocar las pesas.
- Perilla para soplar
- Pincel de cerda suave
- Blusa, zapatones, gorro, entre otros, dependiendo de la zona de trabajo.
- Polipastos, grúas, montacargas y eslingas para manipulación de pesas grandes.

- Requisitos metrológicos del equipamiento y sistemas de medición

Los requisitos metrológicos y características físicas de los patrones están especificados en la norma NTC 1848 [1].



6.3. Condiciones ambientales

La calibración de pesas debería ser llevada a cabo a condiciones ambientales estables, bajo presión atmosférica ambiente y a temperatura controlada.

Es importante que la diferencia de temperatura entre las pesas y el instrumento de pesaje sea lo más pequeña posible. Manteniendo las pesas de referencia y de prueba en la misma área antes de la calibración, se puede reducir esta diferencia de temperatura.

De acuerdo con la norma NTC 1848 [1], las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa para la calibración de pesas son:

Tabla 2. Condiciones ambientales durante calibración.

Clase de pesa	Cambio de temperatura durante la calibración
E ₁	± 0.3 °C por hora con un máximo de ± 0.5 °C por 12 horas
E ₂	± 0.7 °C por hora con un máximo de ± 1 °C por 12 horas
F ₁	± 1.5 °C por hora con un máximo de ± 2 °C por 12 horas
F ₂	± 2 °C por hora con un máximo de ± 3.5 °C por 12 horas
M ₁	± 3 °C por hora con un máximo de ± 5 °C por 12 horas

Clase de pesa	Cambio de humedad relativa durante la calibración
E ₁	40 % a 60 % con un máximo de ± 5 % por 4 horas
E ₂	40 % a 60 % con un máximo de ± 10 % por 4 horas
F	40 % a 60 % con un máximo de ± 15 % por 4 horas

6.4. Proceso de calibración

6.4.1 Operaciones previas

De acuerdo con el intervalo del juego de pesas que se desee calibrar se seleccionan los equipos de comparación. Los equipos de comparación siempre deberían estar conectados a la red de suministro de energía eléctrica por lo



menos con 24 horas de antelación. Antes de iniciar el proceso de calibración se verifica que no exista polvillo o partículas sobre el platillo del instrumento de pesaje, por lo tanto, es necesario hacer una limpieza soplando aire con la perilla o limpiando con un pincel.

Para la selección del patrón de referencia en una calibración, se tiene en cuenta la clase de exactitud de la pesa de prueba; en cualquier caso, se debería asegurar que la clase de exactitud del patrón de referencia sea mejor respecto a la pesa de prueba, tal como se indica en la ecuación (10).

Antes de la calibración, el juego de pesas o la pesa se somete a una inspección con el fin de determinar la presencia de impurezas, deformidades, manchas, rayones o cualquier otro aspecto físico que pueda afectar el resultado de la calibración y en caso de ser necesario a limpieza antes de su calibración; es importante dejar registro de lo evidenciado. Las pesas se identifican unívocamente y se ubican en áreas debidamente señalizadas.

En caso de limpiar una pesa o juego de pesas, se debería realizar una medición de las pesas a calibrar antes y después de dicho proceso, evitando en todo momento que el platillo del instrumento de pesaje se contamine. Los resultados de la medición antes y después de la limpieza deben ser reportados al cliente en el certificado de calibración.

En caso de realizar ajustes a una pesa o juego de pesas con cavidad, es necesario realizar una calibración de las pesas antes y después del proceso de ajuste. Los resultados antes y después de este proceso deben ser reportados al cliente en el certificado de calibración.

6.4.2 Proceso de calibración

A continuación, se describen los pasos a seguir para el proceso de calibración:

- a) Registro de las condiciones ambientales, puede ser al principio y al final de la medición o registrando las variaciones máximas y mínimas durante la calibración. Las condiciones ambientales durante todo el proceso deberían estar bajo los límites establecidos en el numeral 6.3 de este documento.
- b) Realización de un ciclo de pesada teniendo en cuenta el método de calibración seleccionado.
- c) Repetición del ciclo de pesada n veces. La cantidad mínima de ciclos a realizar de acuerdo con la clase de exactitud se presenta en la tabla 3³.

³ Este documento no especifica un número máximo de ciclos de pesada a realizar. El laboratorio de calibración puede seleccionar tantos ciclos como considere adecuados para su proceso de calibración.



- d) Estimación del valor de masa de las masas a calibrar y evaluación de la incertidumbre de medición asociada.
- e) Estimación del valor de masa convencional de las masas a calibrar y evaluación de la incertidumbre en masa convencional.

Tabla 3. Cantidad mínima de ciclos de pesaje

Clase de exactitud	E ₁	E ₂	F ₁	F ₂	M ₁ , M ₂ , M ₃
Número mínimo de ciclos ABBA	3	2	1	1	1
Número mínimo de ciclos ABA	5	3	2	1	1
Número mínimo de ciclos AB ₁ ...B _n A	5	3	2	1	1

El ajuste interno del instrumento de pesaje solamente se debe realizar antes de iniciar el proceso de calibración, luego se recomienda hacer al menos cuatro (4) pre pesadas con la pesa de prueba colocando la pesa de manera suave sin golpear el platillo; no es necesario registrar estos datos. Registrar las condiciones ambientales y continuar con los pasos descritos anteriormente.

6.4.2.1 Método ABBA

Una vez que la pesa patrón (referencia) se coloca sobre el plato del instrumento de pesaje, se espera que se estabilice la lectura, se registra la lectura I_{r1} , se retira la pesa y luego se ubica la pesa de prueba, se espera que se estabilice la lectura, se registra el dato I_{t1} , se retira y ubica nuevamente la pesa de prueba y se registra la lectura I_{t2} ; para cerrar el ciclo se ubica nuevamente la pesa patrón y se registra la lectura I_{r2} . Siguiendo esta secuencia, se obtiene:

$$\Delta I_i = \frac{I_{t1i} - I_{r1i} - I_{r2i} + I_{t2i}}{2} \quad (12)$$

donde $i = 1, \dots, n$

6.4.2.2 Método ABA

Una vez que la pesa patrón (referencia) se coloca sobre el plato del instrumento de pesaje, se espera que se estabilice la lectura, se registra la lectura I_{r11} , se retira la pesa y luego se ubica la pesa de prueba, se espera que se estabilice la lectura, se registra el dato I_{t11} , se retira y ubica nuevamente la pesa patrón y se registra la lectura I_{r21} . Siguiendo esta secuencia, se obtiene:



$$\Delta I_i = I_{t1i} - \frac{I_{r1i} + I_{r2i}}{2} \quad (13)$$

donde $i = 1, \dots, n$

6.4.2.3 Método $A_1B_1 \dots B_nA_2$

Este método es adecuado para calibraciones de varias pesas de un mismo valor nominal. Una vez puesta la pesa patrón (referencia) sobre el plato del instrumento de pesaje, se espera que se estabilice la lectura, se registra la lectura I_{r11} , se retira la pesa y luego se ubica la primera pesa de prueba, se espera que se estabilice la lectura, se registra el dato I_{t11} , se retira y ubica la segunda pesa de prueba, se espera que estabilice la lectura, se registra el dato I_{t21} , se retira y se ubica la tercera pesa de prueba, y así sucesivamente hasta colocar la última pesa de prueba, se espera que estabilice la lectura y se registra el dato I_{tn1} ; para cerrar el ciclo se ubica nuevamente la pesa patrón y se registra la lectura I_{r21} . Para iniciar un nuevo ciclo, se coloca nuevamente la pesa de referencia y posteriormente se colocan las pesas de prueba comenzando por la última colocada en el ciclo anterior y así hasta registrar una nueva lectura de todas las pesas de prueba. Siguiendo esta secuencia se obtiene:

$$\Delta I_{i(j)} = I_{t(j)i} - \frac{I_{r1i} + I_{r2i}}{2} \quad (14)$$

donde $i = 1, \dots, n$ y $j = 1, \dots, 5$

Este método es recomendable para máximo cinco pesas de prueba para minimizar la deriva del instrumento de pesaje. En caso de que la deriva del instrumento de pesaje sea menor o igual a un tercio de la incertidumbre requerida, no es necesario invertir la secuencia de pesada de las pesas de prueba, cuando se repita la secuencia.

6.4.3 Tratamiento de datos y resultados

La ecuación (9) representa, de forma general, el cálculo de la masa de una pesa bajo calibración. Esta ecuación se puede reescribir como:

$$m_t = m_r + \overline{\Delta m} \quad (15)$$

Donde:

m_t : es la masa de la pesa bajo calibración,
 m_r : es la masa de la pesa de referencia, y
 $\overline{\Delta m}$: es el promedio de la diferencia de masa en los n ciclos de pesada



Este último término se calcula mediante la expresión:

$$\overline{\Delta m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta m_i \quad (16)$$

Donde

Δm_i : es la diferencia de masa entre la pesa bajo calibración y la pesa de referencia en el ciclo i .

A partir de la ecuación (9), se deduce que el término Δm_i viene dado por la ecuación:

$$\Delta m_i = \Delta I_i + \rho_{ai}(V_t - V_r) \quad (17)$$

Donde el término ΔI_i se calcula a partir de las ecuaciones (12), (13) o (14) dependiendo del método de calibración seleccionado.

Los laboratorios de calibración ubicados en lugares en donde la densidad del aire se desvía en más de un 10 % del valor 1.2 kg m^{-3} (es decir $\rho_a \leq 1.08 \text{ kg m}^{-3}$) deben calcular la masa de la pesa bajo calibración siguiendo el presente documento, y a partir de este valor deben calcular su valor de masa convencional [1]. Los laboratorios cuyo valor de densidad del aire es cercano al valor 1.2 kg m^{-3} pueden calcular directamente la masa convencional de la pesa bajo calibración, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma NTC 1848.

El valor de masa convencional de una pesa es calculado mediante la ecuación [3]:

$$m_{ct} = m_t \frac{\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_t}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{ref}}\right)} \quad (18)$$

Donde:

m_{ct} : es la masa convencional de la pesa bajo calibración,
 ρ_0 : es la densidad del aire de referencia ($\rho_0 = 1.2 \text{ kg m}^{-3}$),
 ρ_t : es la densidad de la pesa bajo calibración, y
 ρ_{ref} : es la densidad de referencia para las pesas ($\rho_{ref} = 8\,000 \text{ kg m}^{-3}$)



Para la estimación de la densidad del aire, es recomendable para la calibración de pesas clase E y F_1 usar la fórmula conocida como CIPM 2007 [7], dado que permite obtener la menor incertidumbre posible para esta variable. No obstante, es posible usar la ecuación denominada “fórmula aproximada para la densidad del aire” [1], siempre y cuando el laboratorio de calibración demuestre que su contribución a la incertidumbre total no afecta las Capacidades de Medición y Calibración del laboratorio.

6.5 Evaluación de la incertidumbre de medición

Para la evaluación y cálculo de las componentes de incertidumbre se siguen los lineamientos establecidos en los siguientes documentos NTC 1848 [1] y *The Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* – GUM (JCGM 100:2008) [8].

Para la evaluación de la incertidumbre de medición es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La incertidumbre de las pesas bajo calibración no debe ser mayor a un tercio del error máximo permitido de la clase de exactitud de la pesa.
- En el certificado de calibración se debe declarar el volumen (o densidad) e incertidumbre asociada de la pesa bajo calibración. Para la calibración de patrones de masa clase E, no se recomienda usar los valores de densidad establecidos en la tabla B.7, numeral B.7.9.3 de la norma NTC 1848, toda vez que se tiene una alta probabilidad de obtener una incertidumbre de medición mayor a un tercio del error máximo permitido de la clase de exactitud de la pesa.

A partir de la ecuación (9) se consideran las siguientes fuentes de incertidumbre:

- Patrón de referencia
- Variación del patrón de referencia en el tiempo (deriva)
- Instrumento donde se lleva a cabo la comparación
- Proceso de comparación
- Corrección por empuje del aire

6.5.1. Fuentes de incertidumbre de medición



6.5.1.1 Evaluación de la incertidumbre de la masa

Aplicando la ley de propagación de incertidumbre a la ecuación (9) y considerando que no hay una correlación significativa entre las componentes se tiene:

$$u^2(m_t) = u^2(m_r) + u_{inst}^2(m_r) + u_b^2 + u_w^2(\overline{\Delta m}) + u_{ba}^2 \quad (19)$$

A continuación, se analizan cada una de las contribuciones a la incertidumbre de medición mostradas en la ecuación (19).

6.5.1.1.1 Incertidumbre debida a la diferencia de indicación (Tipo A)

La componente de incertidumbre del proceso de pesaje, considerada como tipo A, corresponde a la desviación estándar de la media del proceso de calibración. Para n ciclos de medición se tiene:

$$u_w(\overline{\Delta m}) = \frac{s(\Delta m)}{\sqrt{n}} \quad (20)$$

Para calibración de patrones de masa clase E y F₁, la varianza de la diferencia de masa $s^2(\Delta m)$ viene dado por:

$$s^2(\Delta m) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta m_i - \overline{\Delta m})^2 \quad (21)$$

Para la calibración de patrones de masa clase F₂ y M, si la desviación estándar de la diferencia de masa no se conoce a partir de datos históricos, ésta puede ser calculada mediante la expresión:

$$s^2(\Delta m) = \frac{\max(\Delta m_i) - \min(\Delta m_i)}{2\sqrt{3}} \quad (22)$$

Para $n \geq 3$ ciclos de medición. Lo anterior no implica que el laboratorio de calibración no pueda usar la ecuación (21), si así decide hacerlo.

6.5.1.1.2 Incertidumbre de la masa del patrón de referencia (Tipo B)



Esta componente de incertidumbre se obtiene del certificado de calibración de las pesas de referencia $U(m_r)$, dividido por el factor de cobertura correspondiente k .

$$u(m_r) = \frac{U(m_r)}{k} \quad (23)$$

En el caso de realizar la calibración con varios patrones de referencia, las incertidumbres se suman aritméticamente, luego se tiene:

$$u(m_r) = \sum_i u(m_r)_i \quad (24)$$

6.5.1.1.3 Incertidumbre debida a la inestabilidad de la pesa de referencia (Tipo B)

Para estimar esta fuente de incertidumbre, se parte del histórico de calibraciones sucesivas de la pesa de referencia, se estima una variación de su masa Δm_r , que viene dada por la diferencia máxima de masa entre dos calibraciones sucesivas. La incertidumbre debida a la deriva viene dada entonces por:

$$u_{inst}(m_r) = \frac{\Delta m_r}{\sqrt{3}} \quad (25)$$

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

$$u_{inst}(m_r) = \frac{D}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

Donde D es un término que es escogido considerando factores como: clase de exactitud de la pesa de referencia, frecuencia de uso, resultados de comprobaciones intermedias, entre otros. Una opción razonable es asociar D con la incertidumbre combinada o la incertidumbre expandida de la pesa de referencia, esto es $D = U(m_r)$ o $D = u(m_r)$.

6.5.1.1.4 Incertidumbre debida a la corrección por empuje del aire (Tipo B)

La incertidumbre debido al empuje del aire se calcula mediante la ecuación:



$$u_b(m_t) = \sqrt{(V_t - V_r)^2 u^2(\rho_a) + \rho_a^2 (u^2(V_t) - u^2(V_r))} \quad (27)$$

Para el cálculo de la incertidumbre de la densidad del aire se tienen en cuenta los valores de incertidumbre de los instrumentos de medición de condiciones ambientales usados durante el proceso de calibración, su resolución, la inestabilidad de las condiciones ambientales y la deriva en el tiempo de cada uno de estos.

El volumen de la pesa de prueba V_t y su incertidumbre $u(V_t)$ se obtienen del certificado de calibración $U(V_t)$, con el factor de cobertura correspondiente k .

$$u(V_t) = \frac{U(V_t)}{k} \quad (28)$$

Cuando no está disponible el volumen, pero se conoce la densidad de la pesa de prueba, éste se obtiene a partir de la relación $V_t = m_N / \rho_t$, donde m_N corresponde al valor nominal de la pesa y ρ_t corresponde a su densidad. La densidad puede ser obtenido de dos formas:

- A partir del valor reportado en certificados de calibración.
- Si no se cuenta con esta información, el valor de densidad e incertidumbre se toma de la tabla B.7 de la norma NTC 1848.

NOTA: Para calibración de pesas clase E y F_1 , solo se debería usar el valor de densidad e incertidumbre reportado en el certificado de calibración.

Una vez conocido el valor de densidad de la pesa de prueba y su incertidumbre asociada, la incertidumbre del volumen de la pesa de prueba se calcula mediante la expresión:

$$u(V_t) = V_t \frac{u(\rho_t)}{\rho_t} \quad (29)$$

Para el volumen de la pesa de referencia aplican las mismas consideraciones indicadas anteriormente, sin embargo, la incertidumbre del volumen de la pesa de referencia se calcula mediante la ecuación.

$$u(V_r) = V_r \frac{u(\rho_r)}{\rho_r} \quad (30)$$



Para cualquier caso se considera despreciable la incertidumbre debida a la dilatación del volumen por la variación de temperatura.

6.5.1.1.5 Incertidumbre debida al instrumento de pesaje (Tipo B)

6.5.1.1.5.1 Incertidumbre debida a la resolución del instrumento de pesaje

Para instrumentos de pesaje digitales con resolución d , la incertidumbre viene dada por:

$$u_d = \left(\frac{d}{2\sqrt{3}} \right) \cdot \sqrt{2} \quad (31)$$

Donde el término $\sqrt{2}$ es incluido debido a dos lecturas en el instrumento de pesaje, una asociada a la pesa de referencia y la segunda a la pesa de prueba.

6.5.1.1.5.2 Incertidumbre debida a la excentricidad

En la mayoría de los casos, la componente de incertidumbre debido a la excentricidad del instrumento de pesaje u_E ya está cubierta por la incertidumbre debida al proceso de pesaje u_w y por lo tanto puede ser ignorada. No obstante, si el laboratorio de calibración considera que esta contribución es significativa en su proceso de medición, o en el caso en donde sean usados varias pesas como patrones de referencia, es necesario incluir esta componente de incertidumbre siguiendo lo establecido en el numeral C.6.4.4.1 o C.6.4.4.2 de la norma NTC 1848 [1].

6.5.1.1.5.3 Incertidumbre debida al magnetismo

Para la incertidumbre debida al magnetismo u_{ma} se toman las mismas consideraciones establecidas en el numeral C.6.4.5 de la norma NTC 1848 [1].

6.5.1.1.5.4 Incertidumbre estándar combinada del instrumento de pesaje

Los componentes de incertidumbre debidos al instrumento de pesaje se suman cuadráticamente, luego se tiene:

$$u_{ba} = \sqrt{u_d^2 + u_E^2 + u_{ma}^2} \quad (32)$$



6.5.1.2 Incertidumbre estándar combinada de la masa

Teniendo en cuenta el desarrollo anterior, la incertidumbre estándar combinada de la masa viene dada por la ecuación:

$$u_c(m_t) = \sqrt{u_w^2(\Delta m) + u^2(m_r) + u_{inst}^2(m_r) + u_b^2(m_t) + u_{ba}^2} \quad (33)$$

6.5.1.2 Incertidumbre estándar combinada de la masa convencional

El cálculo de la incertidumbre estándar combinada en masa convencional se realiza de forma análoga al presentado en las secciones 6.5.1.1.1 a 6.5.1.1.5, a excepción de la componente debido al empuje del aire, que se calcula a través de la expresión:

$$u_b(m_{ct}) = \sqrt{(V_t - V_r)^2 u^2(\rho_a) + (\rho_a - \rho_0)^2 [u^2(V_t) + u^2(V_r)]} \quad (34)$$

Debido al término $(\rho_a - \rho_0)^2 [u^2(V_t) + u^2(V_r)]$ en la ecuación anterior, en general la incertidumbre estándar combinada para la masa convencional es siempre menor o igual a la incertidumbre combinada en masa.

Teniendo en cuenta la ecuación (34), la incertidumbre estándar combinada para la masa convencional viene dada por la ecuación:

$$u_c(m_{ct}) = \sqrt{u_w^2(\Delta m) + u^2(m_r) + u_{inst}^2(m_r) + u_b^2(m_{ct}) + u_{ba}^2} \quad (35)$$

6.5.2. Incertidumbre expandida de medición

La incertidumbre expandida para la masa convencional viene dada por:

$$U(m_{ct}) = k \cdot u_c(m_{ct}) \quad (36)$$

Con un factor de cobertura $k = 2$ para un nivel de confianza de aproximadamente 95%. El cálculo de los grados efectivos de libertad para la evaluación del factor de cobertura se debería realizar usando la ecuación de Welch-Satterthwaite (ecuación G.2b, numeral G.4.1 de la GUM [8])

Se debe verificar en cada calibración que el valor obtenido en la ecuación (36) cumpla la relación:



$$U(m_{ct}) \leq \frac{1}{3} EMP \quad (37)$$

6.6. Aseguramiento de la validez de los resultados

Para asegurar la validez de los resultados de procesos de calibración de pesas se recomienda utilizar la información presentada en el anexo D de la norma NTC 1848 [1].

6.7. Presentación de los resultados

Los resultados se reportan en masa convencional indicando el valor de masa nominal, la desviación de la masa convencional con respecto a su valor nominal, y la incertidumbre expandida con un factor de cobertura $k = 2$ que da un nivel de confiabilidad de aproximadamente 95% (teniendo en cuenta el teorema del límite central y lo señalado en la GUM numeral 6.3 [8]).

El certificado o informe de calibración debe cumplir con los requisitos indicados en ISO/IEC 17025. Los resultados se deben presentar de manera exacta, clara, inequívoca y objetiva. Se debe incluir toda información necesaria para la interpretación de los resultados de medición y una descripción del método utilizado [9].

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NTC 1848:2007, Pesas de clases E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ y M₃. Parte 1: Requisitos metrológicos y técnicos. Generalidades.
- [2] NTC 2031:2014, Instrumentos de pesaje de funcionamiento no automáticos. Requisitos metrológicos y técnicos. Pruebas.
- [3] OIML International Document D 28. *Conventional value of the result of weighing in air*. Edition 2004 (E).
- [4] Comprehensive Mass Metrology. Editado por Prof.Dr.-Ing. Manfred Kochsiek y Dr.rer.nat. Michael Gläser. Copyright © 2000 Wiley-VCH Verlag Berlin GmbH, Berlin.



[5] Vocabulario Internacional de Metrología VIM. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. Edición del VIM 2008 con inclusión de pequeñas correcciones. 3ª edición en español. Centro Español de Metrología.

[6] Guía Técnica sobre Trazabilidad metrológica e incertidumbre de medida en la magnitud de masa para la calibración de pesas clase E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ y M₃. Guía de calibración M-01 pesas. Centro Nacional de Metrología CENAM, 2015.

[7] A. Picard *et al* 2008 *Metrologia* **45** 149. *Revised formula for the density of moist air* (CIPM-2007)

[8] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement: GUM 1995 with minor corrections, First ed., BIPM, 1995.

[9] NTC ISO/IEC 17025, Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración, 2017.



8. ANEXOS

Anexo 1. Ejemplo de calibración de un patrón de masa de valor nominal 1 kg clase E₂

- Datos pesa de prueba

Valor nominal	1 kg
Clase de exactitud	E ₂ OIML
Serial	NIM 010213
Marcación	Ninguna
Fabricante	Kern
Densidad	7 898.9 kg/m ³
Incertidumbre de densidad	20 kg/m ³ ($k = 2$)

El volumen de la pesa de prueba se calcula utilizando la relación entre volumen, masa y densidad, esto es:

$$V_t = \frac{m_N}{\rho_t}$$

$$V_t = \frac{1 \text{ kg}}{7898.9 \text{ kg/m}^3}$$

$$V_t = 126.599 \ 906 \ 316 \ 069 \text{ cm}^3$$

- Datos pesa de referencia

Valor nominal	1 kg
Clase de exactitud	Mejor que E ₁ OIML
Serial	NIM 010104
Marcación	Ninguna
Fabricante	Häfner
Desviación en masa	-0.08 mg
Incertidumbre de masa	0.10 mg ($k = 2$)
Densidad	8007.24 kg/m ³
Incertidumbre de densidad	0.13 kg/m ³ ($k = 2$)
Volumen	124.887 cm ³
Incertidumbre de volumen	0.002 cm ³ ($k = 2$)
Densidad del aire (calibración)	1.195 31 kg/m ³
Deriva	0 mg



- Proceso de medición**

Para la medición se realiza serie de 6 ciclos de comparación ABBA; las mediciones se realizan usando un comparador de masa comercial con resolución $d = 0.001$ mg, el cual automáticamente ejecuta la función de tara al comenzar el registro de los resultados de medición. Los datos obtenidos son:

	Indicación (mg)	Diferencia B-A (mg)
A	0.000	1.254
B	1.255	
B	1.255	
A	0.002	
A	0.001	1.255
B	1.257	
B	1.257	
A	0.003	
A	0.004	1.255
B	1.259	
B	1.260	
A	0.005	
A	0.005	1.255
B	1.260	
B	1.261	
A	0.006	
A	0.006	1.254
B	1.260	
B	1.258	
A	0.004	
A	0.003	1.254
B	1.256	
B	1.255	
A	0.000	
	Promedio (mg)	1.254 5
	Desviación estándar (mg)⁴	0.000 550

Las condiciones ambientales iniciales y finales durante el proceso de medición son,

⁴ Por simplicidad, se omite incluir la totalidad de cifras decimales, no obstante, es muy importante mencionar la importancia de incluir todas las cifras decimales en los cálculos y, al momento de reportar los resultados de calibración, seguir lo indicado en el numeral 7.2.6 de la GUM [8].



	Iniciales	Finales
Temperatura (°C)	20.944	20.971
Humedad relativa (%)	45.84	46.27
Presión atmosférica (hPa)	752.887	753.180

Con estos datos se calcula la densidad del aire y su incertidumbre usando la fórmula CIPM 2007. Los valores obtenidos son:

$$\rho_a = 0.887\,099\,969\,\text{kg m}^{-3}$$

$$U(\rho_a) = 0.000\,247\,752\,\text{kg m}^{-3}$$

- Determinación de masa y masa convencional**

Aplicando las ecuaciones (15) y (17), la masa de la pesa de prueba es:

$$m_t = 1\,000\,\text{g} - 0.08\,\text{mg} + 0.887\,099\,969\,\text{kg m}^{-3} \cdot (126.599\,\text{cm}^3 - 124.887\,\text{cm}^3) + 1.2545\,\text{mg}$$

$$m_t = 1\,000.002\,887\,406\,32\,\text{g}$$

Ahora bien, teniendo en cuenta que la masa de la pesa de prueba se puede escribir como

$$m_t = m_N + \delta m_t$$

donde δm_t es la desviación de la masa con respecto a su valor nominal. A partir de esto se tiene:

$$\delta m_t = 1\,000.002\,887\,406\,32\,\text{g} - 1\,000\,\text{g}$$

$$\delta m_t = 2.887\,406\,316\,062\,88\,\text{mg}$$

El valor que debe ser reportado en el certificado de calibración corresponde a la masa convencional, la cual se debe calcular utilizando la ecuación (18), luego se tiene:

$$m_{ct} = m_t \frac{\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_t}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{ref}}\right)}$$



$$m_{ct} = 1\,000.002\,887\,406\,32\text{ g} \cdot \frac{\left(1 - \frac{1.2\text{ kg/m}^3}{7898.9\text{ kg/m}^3}\right)}{\left(1 - \frac{1.2\text{ kg/m}^3}{8000\text{ kg/m}^3}\right)}$$

$$m_{ct} = 1\,000.000\,967\,225\,17\text{ g}$$

$$\delta m_{ct} = 0.967\,225\,166\,050\,412\text{ mg}$$

• Determinación de la incertidumbre de la masa

A continuación, se presenta el cálculo para cada componente de incertidumbre de la masa.

- Incertidumbre debida a la diferencia de indicación

Para calcularla se tiene en cuenta la desviación estándar obtenida y el número de ciclos de comparación. Utilizando la ecuación (20) se tiene:

$$u_w(\overline{\Delta m}) = \frac{s(\Delta m)}{\sqrt{n}}$$

$$u_w(\overline{\Delta m}) = \frac{0.000\,550\text{ mg}}{\sqrt{6}}$$

$$u_w(\overline{\Delta m}) = 2.236\,067\,977\,499\,54 \times 10^{-4}\text{ mg}$$

- Incertidumbre de la masa del patrón de referencia

Utilizando la ecuación (23) se tiene,

$$u(m_r) = \frac{0.10\text{ mg}}{2}$$

$$u(m_r) = 0.05\text{ mg}$$

- Incertidumbre debida a la inestabilidad del patrón (deriva)

Teniendo en cuenta que no se cuenta con un valor de variación de masa a partir de datos de calibraciones sucesivas, la incertidumbre debida a la inestabilidad del patrón se calcula utilizando la ecuación (26), escogiendo $D = u(m_r)$. De esta manera se tiene,

$$u_{inst}(m_r) = \frac{u(m_r)}{\sqrt{3}}$$



$$u_{inst}(m_r) = \frac{0.05 \text{ mg}}{\sqrt{3}}$$

$$u_{inst}(m_r) = 0.028\,867\,513\,459\,481\,3 \text{ mg}$$

- Incertidumbre debida a la corrección por empuje del aire

Para este cálculo se requiere conocer la incertidumbre del volumen de la pesa de prueba, la cual es determinada utilizando la ecuación 29. Con esto se tiene:

$$u(V_t) = 126.599\,906\,316\,069 \text{ cm}^3 \cdot \frac{10 \text{ kg/m}^3}{7\,898.9 \text{ kg/m}^3}$$

$$u(V_t) = 0.160\,275\,362\,792\,375 \text{ cm}^3$$

Conociendo esta incertidumbre y la incertidumbre del volumen de la pesa de referencia se tiene, usando la ecuación (27),

$$(V_t - V_r)^2 u^2(\rho_a) = (126.599\,906\,316\,069 \text{ cm}^3 - 124.887 \text{ cm}^3)^2 \left(\frac{0.002\,247\,752 \text{ kg/m}^3}{2} \right)^2$$

$$(V_t - V_r)^2 u^2(\rho_a) = 4.502\,374\,004\,872\,44 \times 10^{-8} \text{ mg}^2$$

$$\begin{aligned} \rho_a^2 [u^2(V_t) - u^2(V_r)] \\ = (0.887\,099\,969 \text{ kg m}^{-3})^2 \left[(0.160\,275\,362\,792\,375 \text{ cm}^3)^2 - \left(\frac{0.002 \text{ cm}^3}{2} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

$$\rho_a^2 [u^2(V_t) - u^2(V_r)] = 0.020\,214\,442\,050\,229\,4 \text{ mg}^2$$

Con esto, se tiene

$$u_b(m_t) = \sqrt{4.502\,374\,004\,872\,44 \times 10^{-8} \text{ mg}^2 + 0.020\,214\,442\,050\,229\,4 \text{ mg}^2}$$

$$u_b(m_t) = 0.142\,177\,660\,249\,314 \text{ mg}$$

- Incertidumbre debida a la corrección por empuje del aire (masa convencional)

Para realizar este cálculo se tiene en cuenta la ecuación (34), luego se tiene:

$$(V_t - V_r)^2 u^2(\rho_a) = 4.502\,374\,004\,872\,44 \times 10^{-8} \text{ mg}^2$$



$$\begin{aligned} &(\rho_a - \rho_0)^2 [u^2(V_t) + u^2(V_r)] \\ &= (0.887\,099\,969\,\text{kg m}^{-3} - 1.2\,\text{kg m}^{-3})^2 \\ &\quad \cdot \left[(0.160\,275\,362\,792\,375\,\text{cm}^3)^2 + \left(\frac{0.002\,\text{cm}^3}{2} \right)^2 \right] \\ &(\rho_a - \rho_0)^2 [u^2(V_t) + u^2(V_r)] = 0.002\,515\,137\,054\,879\,87\,\text{mg}^2 \end{aligned}$$

Con esto, se tiene

$$u_b(m_{ct}) = \sqrt{4.502\,374\,004\,872\,44 \times 10^{-8}\,\text{mg}^2 + 0.002\,515\,137\,054\,879\,87\,\text{mg}^2}$$

$$u_b(m_{ct}) = 0.050\,151\,590\,987\,923\,\text{mg}$$

- Incertidumbre debida al instrumento de pesaje

La resolución del instrumento de comparación utilizado es $d = 0.001\,\text{mg}$. La componente de incertidumbre se calcula utilizando la ecuación (31).

$$u_d = \frac{0.001\,\text{mg}}{\sqrt{6}}$$

$$u_d = 0.000\,408\,248\,290\,463\,863\,\text{mg}$$

Para el presente ejemplo, se considera que el proceso de medición no se ve influenciado por efectos de excentricidad del instrumento de pesaje y por interacciones magnéticas, por lo tanto y siguiendo la ecuación (32), la incertidumbre debida al instrumento de pesaje es

$$u_{ba} = 0.000\,408\,248\,290\,463\,863\,\text{mg}$$

- Incertidumbre combinada de la masa

La incertidumbre combinada de la masa se calcula utilizando la ecuación (33); de esta manera se tiene:

$$\begin{aligned} &u_c(m_t) \\ &\cong \sqrt{(2.236 \times 10^{-4}\,\text{mg})^2 + (0.05\,\text{mg})^2 + (0.028\,\text{mg})^2 + (0.142\,\text{mg})^2 + (0.000\,408\,\text{mg})^2} \end{aligned}$$

$$u_c(m_t) \cong 0.153\,\text{mg}$$

- Incertidumbre combinada de la masa convencional



La incertidumbre combinada de la masa convencional se calcula utilizando la ecuación (35); de esta manera se tiene:

$$u_c(m_{ct}) \cong \sqrt{(2.236 \times 10^{-4} \text{ mg})^2 + (0.05 \text{ mg})^2 + (0.028 \text{ mg})^2 + (0.050 \text{ mg})^2 + (0.000 408 \text{ mg})^2}$$
$$u_c(m_{ct}) \cong 0.076 \text{ mg}$$

Como se puede observar, la incertidumbre combinada para la masa convencional es menor a la incertidumbre combinada en masa, tal como se indica en el numeral 6.5.1.2.

Finalmente, usando un factor de cobertura $k = 2$ y de acuerdo con la ecuación (36), la incertidumbre expandida para la masa convencional obtenida por el laboratorio es,

$$U(m_{ct}) = 2 \cdot 0.076 \text{ mg}$$

$$U(m_{ct}) = 0.152 \text{ mg}$$

A continuación, se verifica que el valor obtenido para la incertidumbre expandida cumpla la relación de la ecuación (37). Para una pesa de 1 kg clase E₂, el error máximo permitido presentado en la tabla 1 de la norma NTC 1848 corresponde a 1.6 mg y la incertidumbre a 0.5 mg. De esta manera se tiene,

$$0.152 \text{ mg} \leq \frac{1.6 \text{ mg}}{3}$$

$$0.152 \text{ mg} \leq 0.533 \text{ mg}$$

Con esto, se observa que la incertidumbre expandida calculada por el laboratorio es menor que la incertidumbre a reportar en el certificado de calibración, por lo tanto, es posible reportar una incertidumbre igual a un tercio del error máximo permitido.

Finalmente, teniendo en cuenta que los resultados a reportar en un certificado de calibración se deben redondear hasta dos cifras significativas según lo establecido en la GUM [8], los resultados de la calibración a reportar al cliente son:

$$m_{ct} = 1 \text{ kg} + 0.97 \text{ mg}$$

$$U(m_{ct}) = 0.53 \text{ mg}$$

Instituto Nacional de Metrología de Colombia - INM
Subdirección de Metrología Física, Red Colombiana de Metrología.

Av. Cra 50 No 26-55 Int. 2 CAN - Bogotá, D.C. Colombia

Conmutador: (571) 254 22 22

E-mail: contacto@inm.gov.co

www.inm.gov.co

Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC

Av. Calle 26 # 57 – 83, Torre 8, Oficina 1001 - Bogotá, D.C. Colombia

PBX: +571 742 7592

E-mail: onac@onac.org.co

www.onac.org.co