

# MEDICIÓN Y CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE LA MAGNITUD MASA

**Coordinadora PROCAME**

M.Sc. Ligia Bermúdez Hidalgo

**Equipo de trabajo:**

Ing. Ana Catalina Leandro Sandí

M.Sc. Manfred Murrell Blanco

Lic. Karla Vetrani Chavarría

**Apoyo logístico:**

Katherine Alfaro Muñoz



# ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN .....	5
2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES .....	7
Concepto de masa (Masa inercial y Masa gravitacional): .....	7
Principio de medición: .....	8
El Principio de Arquímedes: .....	9
La comparación de masas mediante una balanza: .....	10
Patrón de masa: .....	11
La unidad SI de masa:.....	12
Múltiplos y submúltiplos de la unidad de masa del SI:.....	12
Ejercicio 1. Realice las siguientes conversiones.....	13
Diseminación de la unidad de masa: .....	14
Jerarquía de los patrones de masa:.....	14
Métodos de calibración por comparación:.....	16
Comparación en series cerradas (CSC) .....	16
Comparación directa (CD) .....	16
Esquemas de subdivisión y multiplicación (ESM).....	17
Patrones de masa y pesas .....	18
Valor de la masa de una pesa.....	18
Resultado de la pesada.....	19
Valor convencional del resultado de la pesada en el aire .....	19
3. LA OIML R 111. INTERPRETACIÓN Y APLICACIÓN.....	20
Uso de las pesas.....	20
Clasificación .....	21
Exigencias metrológicas.....	21
Características físicas .....	22
Forma y dimensiones .....	23
Construcción y material.....	23
Condiciones de la superficie.....	24
Densidad.....	25

Calibración de pesas .....	26
Proceso de calibración: .....	26
Cálculos .....	26
Ejercicio 3 .....	32
<b>4. INSTRUMENTOS DE PESAR UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA. ....</b>	<b>38</b>
Instrumentos automáticos .....	40
Tipos .....	40
Partes principales .....	40
Principio de medición .....	41
Características metrológicas .....	42
Instrumentos no automáticos (RI – 76) .....	42
Tipos de instrumento .....	42
Partes y dispositivos principales .....	43
Características metrológicas .....	44
Clasificación de los instrumentos de pesar no automáticos .....	44
Errores y errores máximos permisibles de los instrumentos de pesar de funcionamiento no automático ..	45
Propiedades metrológicas de los instrumentos de pesar de funcionamiento no automático. ....	47
Ejercicio 4 .....	49
<b>5. INSTRUMENTOS DE PESAR UTILIZADOS EN EL LABORATORIO.</b>	
<b>CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS .....</b>	<b>51</b>
Instrumentos de funcionamiento no automático .....	52
Tipos de instrumento .....	52
Partes y dispositivos principales .....	53
Características metrológicas .....	53
Propiedades metrológicas .....	54
Linealidad .....	55
Sensibilidad y discriminación .....	55
Reproducibilidad .....	55
Uso, cuidado y conservación de las balanzas de laboratorio .....	56
Instalación y emplazamiento .....	56
Operación de la balanza .....	57
Ejercicio 5 .....	58

6. CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE PESAR DE FUNCIONAMIENTO NO AUTOMÁTICO.....	59
Procedimiento de calibración de los instrumentos que cumplen con la RI 76. ....	60
Condiciones de calibración.....	60
Comprobación del funcionamiento.....	60
Comprobación de las características metrológicas.....	60
Comprobación de las propiedades metrológicas.....	60
Calibración de balanzas por un procedimiento diferente al indicado en la OIML R 76.....	62
Cargas de prueba.....	63
Materiales y reactivos.....	63
Operaciones preliminares.....	63
Procedimiento de calibración.....	64
7. EVALUACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES DURANTE LA CALIBRACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE PESAR.         70	
Aspectos fundamentales del cálculo y expresión de la incertidumbre de la medición.....	70
Definición de Incertidumbre de la medición.....	70
Relación entre error e incertidumbre.....	71
Componentes de incertidumbre estándar.....	72
Evaluación de tipo A de las componentes de incertidumbre estándar.....	73
6.1.5 Evaluación de tipo B de las componentes de incertidumbre estándar.....	74
6.1.6 Incertidumbre del resultado de la medición.....	75
Cálculo de la incertidumbre en la calibración de instrumentos de pesar.....	77
Cálculo de la incertidumbre en la calibración de pesas.....	78
Ejercicio 7.....	78
8. BIBLIOGRAFÍA.....	80
9. RESPUESTAS DE LOS EJERCICIOS.....	81

# 1 INTRODUCCIÓN

Pesar significa comparar, directa o indirectamente, la masa desconocida de un cuerpo con la masa conocida de otro en presencia de la acción de la gravedad sobre ambos cuerpos. En la práctica esta acción se realiza mediante el empleo de los instrumentos de pesar y las pesas.

Los primeros instrumentos de pesar contruidos por el hombre fueron balanzas simples de dos brazos iguales. Le siguieron las balanzas romanas y luego las básculas de plataforma, aéreas, de deflexión, resorte y muchos otros tipos de instrumentos mecánicos que fueron perfeccionándose hasta la aparición de las balanzas electromecánicas y electrónicas que conocemos hoy con diferentes tipos de celdas de pesar incorporadas.

La inmensa mayoría de los instrumentos de pesar que se utilizan en la actualidad no requieren del uso directo de las pesas en el proceso de pesar, reduciendo cada vez más la función de éstas a la calibración de los instrumentos de pesar. Las pesas lógicamente se utilizan además como medidas de referencia para la calibración de otras pesas siguiendo una relación de exactitud generalmente de 1 a 3.

Tanto los instrumentos de pesar como las medidas materializadas que representan físicamente la unidad de masa, encuentran una amplia aplicación en cualquier proceso industrial. De ellos depende en buena medida que se pueda alcanzar la calidad esperada tanto en el proceso como en el producto final.

Las balanzas y las pesas han sido utilizadas por el hombre durante más de 10 000 años para determinar la masa de los cuerpos, sin embargo, los conceptos fundamentales y los requisitos legales para la construcción y el uso de los instrumentos de pesar no se dominan lo suficiente, propiciando en muchos casos la introducción de errores durante las mediciones y una apreciación incorrecta de la instrumentación que se requiere atendiendo a la exactitud de las mediciones que se realizan.



Este curso tiene como objetivo esclarecer los conceptos fundamentales sobre determinación de masa y ofrecer información actualizada suficiente sobre los requisitos técnicos y metroológicos para las pesas y los instrumentos de pesar que pudieran ser sometidos a control metroológico en cualquier país, contenidos en las Recomendaciones Internacionales de la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML R111 y OIML R76).

La actividad de conocer cuantitativamente la masa está presente en todas las actividades humanas. Es por ello que el uso de patrones e instrumentos para determinar la masa es

Hasta el año 1993, entre los profesionales de la metrología existía desacuerdo en cómo evaluar y expresar la incertidumbre que puede ser razonablemente atribuida al resultado de una medición. Debido a la importancia que tenía alcanzar un consenso internacional sobre esta temática, el Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) formó un grupo de trabajo para su estudio, integrado por representantes de las dos instituciones internacionales especializadas en metrología, el BIPM y la OIML, así como otras prestigiosas instituciones tecnológicas internacionales.



## 2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

### Concepto de masa (Masa inercial y Masa gravitacional):

Definir categóricamente el concepto de masa resulta muy difícil por cuanto la Mecánica Clásica y la Física Moderna no permiten explicar completamente su naturaleza exacta. Sin embargo, para los metrologos resulta suficiente el concepto clásico de masa definido hace poco más de 300 años de una forma similar a la siguiente:

**"La masa es una cualidad que manifiesta por sí misma las propiedades inerciales y gravitacionales de los cuerpos"**

La masa de un cuerpo se manifiesta de dos maneras; una es en el cambio de estado de movimiento (inercia) y la otra es en la atracción entre los cuerpos.

Supongamos un túnel al vacío, con un plano que sirva de pista, con la cara superior perfectamente lubricada de forma que, al colocar un objeto sobre esa superficie y al desplazarlo, no exista fricción entre la superficie y el objeto.

Entonces, si el objeto está en reposo y lo ponemos en movimiento, el esfuerzo necesario para moverlo sería una manifestación de la masa del objeto.

En el mismo túnel y en las mismas condiciones, si retiramos la pista, el objeto cae atraído por el planeta Tierra y ésta sería la otra manifestación de la masa del objeto. En ambos casos, tanto la medida del esfuerzo para mover el objeto como la medida de la caída serían la medida de la masa del objeto. Dicho de otra forma, la masa es la cantidad de materia contenida en un volumen determinado mientras que el peso es el resultado de la atracción de la Tierra sobre esa masa.

La vinculación entre la masa y las propiedades inerciales se pone en evidencia cuando dos cuerpos de masas diferentes responden con aceleraciones diferentes ante la acción de una misma fuerza externa. Este es el sentido práctico de la segunda Ley de la Mecánica expresado matemáticamente de la forma:

$$F = m * a$$

Donde F es la fuerza externa, m la masa del cuerpo y a la aceleración de la gravedad.



La masa definida a partir de las propiedades inerciales de los cuerpos se identifica como “masa inercial”.

La vinculación entre la masa y las propiedades gravitacionales se manifiesta en la atracción que tiene lugar entre dos cuerpos que interactúan en un campo gravitacional, digamos por ejemplo el hombre y la Tierra. Dicha ley se expresa matemáticamente del modo siguiente:

$$F = G * \frac{m_1 * m_2}{r^2}$$

Donde G es la constante de gravitación universal ( $6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ ), m la masa de los cuerpos que interactúan y r la distancia entre cuerpos.

La masa definida en función de las propiedades gravitacionales de los cuerpos se identifica como “**masa gravitacional**”.

La experiencia práctica demuestra que la masa inercial y la masa gravitacional son proporcionales entre sí y no son más que dos manifestaciones diferentes de una misma cualidad.

### **Principio de medición:**

Las mediciones de masa, en el rango de interés para la metrología legal e industrial (desde 10-10 hasta 106 kg), se realizan empleando como principio físico de medición la comparación del peso de dos cuerpos que se equilibran mutuamente aproximadamente en el mismo instante y el mismo lugar.

Para los cuerpos en reposo relativo con respecto a la Tierra, suspendidos o apoyados en un punto dado, el peso es la fuerza con que presionan sobre ese punto, como consecuencia de la Ley de la Gravitación Universal. En estos casos la expresión (2) se puede escribir como:

$$P = m * g$$

Donde P es el peso del cuerpo, m la masa del cuerpo y g la aceleración de la gravedad.

La aceleración de la gravedad es la aceleración que adquieren los cuerpos como consecuencia de la atracción que ejerce la Tierra sobre ellos. Como la forma de la Tierra es achatada por los polos y ensanchada por el Ecuador, la atracción que ella ejerce sobre los cuerpos situados en diferentes puntos es diferente y, por tanto, el valor de g no será el mismo en todas las latitudes ni a diferentes alturas.

Si equilibramos dos cuerpos de masas  $m_1$  y  $m_2$  respectivamente que se encuentran en reposo relativo respecto a la Tierra situados aproximadamente en el mismo lugar, la condición de equilibrio ideal puede expresarse de la forma:

$$P_1 = P_2 \pm L$$

Donde  $P_1$  y  $P_2$  son los pesos respectivos de ambos cuerpos y  $\Delta L$  es un factor de corrección de la posición de equilibrio diferente debido a la diferencia entre la masa de los cuerpos y otros factores influyentes. Aplicando la expresión (3) en la expresión (4) obtenemos:

$$m_1 * g_1 = m_2 * g_2 \pm L$$

Como el fenómeno se produce aproximadamente en un mismo sitio, podemos considerar que  $g_1=g_2$  y finalmente obtendremos:

$$m_1 = m_2 \pm L$$

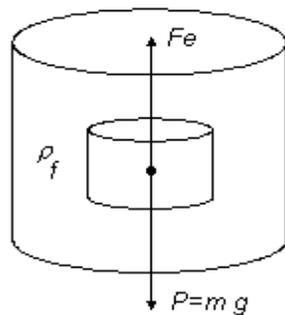
Si conociéramos con suficiente exactitud la masa de uno de los cuerpos, podríamos entonces tomarla como referencia para determinar la masa del otro cuerpo a través de la comparación descrita.

La situación ideal que se ha descrito nos muestra que el valor de masa desconocido de cualquier cuerpo se puede determinar si contamos con otro cuerpo cuya masa se toma como valor de referencia (patrón de masa)

Y con un instrumento en el cual se pueda determinar la diferencia entre los efectos que producen ambos cuerpos (instrumento de pesar). Antes de describir una situación más cercana a la realidad veamos qué sucede cuando pesamos los objetos en el aire.

### El Principio de Arquímedes:

Un cuerpo de masa ( $m$ ) en reposo, sumergido en un fluido de densidad  $\rho_f$ , experimenta una fuerza de abajo hacia arriba (fuerza de empuje) que equivale al peso del fluido desalojado, como se muestra en la figura.



El peso del fluido ( $\rho_f$ ) es el producto de su masa ( $m$ ) por el valor de la aceleración de la gravedad ( $g$ ). Expresando la masa del fluido en términos del volumen y la densidad tendremos:

$$F_e = P_f = m_f \cdot g = V_f \cdot \rho_f \cdot g$$

Como el volumen del fluido desplazado por el cuerpo es igual al volumen del cuerpo ( $V$ ), obtendremos que:

$$F_e = V \cdot \rho_f \cdot g$$

### La comparación de masas mediante una balanza:

- Pesar significa determinar la masa desconocida de un cuerpo (T) con el auxilio de un instrumento de pesar, mediante la comparación de su peso con el peso de otro cuerpo que nos sirve de referencia (R), cuya masa conocemos con suficiente exactitud, en presencia de la acción de la gravedad sobre ambos cuerpos.

- La fórmula (3) se toma como base cuando se comparan dos masas en una balanza, basándonos en que se igualan las masas de dos cuerpos cuando ellos ejercen el mismo peso bajo la misma aceleración de la gravedad (esto es, en el mismo lugar). Sin embargo, esto sólo es cierto si la pesada se realiza en el vacío. Normalmente se pesa en el aire y, por lo tanto, el equilibrio ocurre entre la resultante del peso de los cuerpos y la fuerza de empuje del aire sobre cada uno de ellos.

En la figura 2 se muestra la comparación de la masa de dos cuerpos de volumen  $V_1$  y  $V_2$  respectivamente, utilizando para ello una balanza de brazos iguales. La ecuación que representa el equilibrio de las fuerzas que actúan sobre cada cuerpo es:

$$I_L \cdot (m_1 \cdot g_{loc.} - V_1 \cdot \rho_a \cdot g_{loc.}) = I_R \cdot (m_2 \cdot g_{loc.} - V_2 \cdot \rho_a \cdot g_{loc.})$$

Donde:

$m_1$  y  $m_2$ : Masas de los cuerpos 1 y 2

$V_1$ ,  $V_2$ : Volumen de los cuerpos 1 y 2

$g_{loc.}$ : Aceleración local de la gravedad

$I_L$ ,  $I_R$ : Longitud de los brazos de la balanza (izquierdo y derecho)

$\rho_1$  y  $\rho_2$ : Densidades de los cuerpos 1 y 2

$\rho_a$ : Densidad del aire durante la pesada

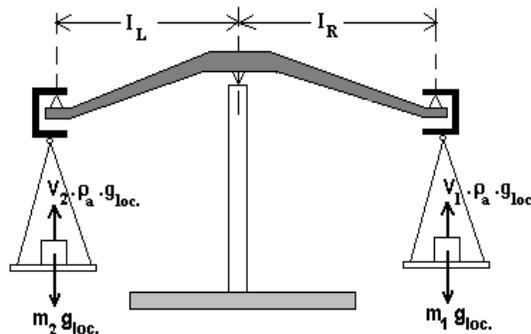


Figura 2

Si los brazos de la balanza son iguales  $I_L=I_R$  y la aceleración de la gravedad se considera constante en la vecindad de la balanza, teniendo en cuenta que  $V=m/\rho$ , se obtiene el siguiente resultado:

$$m_2 = m_1 \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_1}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_2}}$$

A partir de esta ecuación se observa que en la comparación de masas con una balanza, la densidad del cuerpo ensayado y del patrón, así como la densidad del aire en el momento de la comparación, deben tenerse en consideración si existen diferencias apreciables en la densidad de los cuerpos comparados y se requiere alta exactitud en la comparación. Con una incertidumbre relativa en la medición de hasta 10-3, generalmente esta corrección no se requiere.

En actividades comerciales y legales con exactitud hasta 10-4, no se realiza esta corrección por el efecto de la fuerza de empuje del aire y el peso leído en la balanza se considera igual a la masa del cuerpo. Los laboratorios metrológicos pueden cumplir las exigencias de la comparación de pesas hasta las de mayor exactitud clase E1, siguiendo las Recomendaciones Internacionales No. 111 y No. 33, según veremos en el próximo tema.

En general, cuando comparamos un cuerpo cuya masa se desea determinar con un patrón de masa conocida, y se determina la diferencia que existe entre sus pesos mediante una balanza, resultaría la siguiente ecuación para determinar la masa:

$$m_1 = m_p + \rho_a(V_1 - V_p) + \Delta W$$

Donde el subíndice "p" designa al patrón y  $-\Delta W$  es la diferencia entre el peso de ambos cuerpos determinada mediante la balanza.

### Patrón de masa:

La unidad de masa, el kilogramo, se definió originalmente como la masa de un litro de agua a 4 °C. Se modificó esta definición en vista de las dificultades prácticas de obtener agua pura y por el hecho de que la definición involucraba otra magnitud, a saber la temperatura.

Podría argumentarse que el kilogramo es un múltiplo del gramo y que por lo tanto es éste el que debe constituir la unidad. En efecto esto ha sido analizado por los metrólogos pero por razones prácticas se acordó seguir considerando el kilogramo como la unidad de masa.

Como, con el actual conocimiento científico, no se ha podido definir aún la unidad de masa en función de las constantes universales, actualmente se define ésta con base en un artefacto o prototipo, por acuerdo de las 1ª y 3ª Conferencia General de Pesas y Medidas, de 1889 y 1901 respectivamente. Sin embargo, la 21ª Conferencia General de Pesas y Medidas, en octubre de 1999, acordó "recomendar que los laboratorios nacionales continúen sus esfuerzos para refinar experimentos que vinculen la unidad de masa a constantes fundamentales o atómicas con miras a una futura redefinición del kilogramo."

El **kilogramo** (símbolo **kg**) es la unidad de masa; es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo.

Las desigualdades encontradas posteriormente entre las unidades de volumen y masa y los esfuerzos por encontrar un material que ofreciera una mayor estabilidad que el platino motivaron la construcción de nuevos prototipos para el patrón de masa.

Es claro que una balanza analítica de laboratorio no requiere del mismo grado de exactitud que una balanza controladora de vehículos de carga. La exactitud de los patrones de masa puede definirse conforme a las categorías  $E_i$ ,  $F_i$ ,  $M_i$  con valores que van usualmente de un miligramo a 50 kilogramos. A las masas con alta exactitud les corresponde la categoría  $E_i$ , a las masas de exactitud fina les corresponde la categoría  $F_i$  y a las de exactitud media les corresponde la categoría  $M_i$ .

Al estudiar la exactitud de  $m_{1kg}$  la primera composición para estimar la variabilidad es la siguiente:

$$m_{1kg} - (m_{100} + m_{200} + m_{200} + m_{500}) = x$$

Donde  $m_{1kg}$  es el patrón de la masa de un kilogramo y el valor de  $x$  podría pertenecer a cualquiera de las categorías E, F o M.

### La unidad SI de masa:

La unidad de masa del Sistema Internacional de Unidades (SI) es el kilogramo, que a su vez es una de sus 7 unidades básicas. La unidad se define como la masa del prototipo internacional.

El nombre de la unidad, por razones históricas, lleva implícito el nombre de uno de los prefijos SI, el prefijo kilo, que significa multiplicar la unidad por mil. Por esa razón las reglas para la formación de los múltiplos y submúltiplos de la unidad de masa adquieren un carácter particular.

### Múltiplos y submúltiplos de la unidad de masa del SI:

Unidad de medida	Símbolo de la unidad	Relación con respecto al kg
nanogramo	ng	$1 \text{ ng} = 10^{-12} \text{ kg}$
microgramo	$\mu\text{g}$	$1 \mu\text{g} = 10^{-9} \text{ kg}$

Unidad de medida	Símbolo de la unidad	Relación con respecto al kg
miligramo	mg	$1 \text{ mg} = 10^{-6} \text{ kg}$
Grano	g	$1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg}$
kilogramo	kg	Unidad base
megagramo	Mg	$1 \text{ Mg} = 10^3 \text{ kg}$

La inmensa mayoría de los países utiliza el SI como único sistema legal de unidades; pero a pesar de ello, se continúan empleando otras unidades. Por ejemplo en varios países de habla hispana se emplean unidades españolas como la libra (lb) de 16 onzas (oz), la arroba (@) y el quintal (q) con las equivalencias:

$$1 \text{ oz} = 28,75 \text{ g}$$

$$1 \text{ lb} = 460 \text{ g}$$

$$1 \text{ @} = 25 \text{ lb} = 11,5 \text{ kg}$$

$$1 \text{ q} = 4 \text{ @} = 100 \text{ lb} = 46 \text{ kg}$$

En los países anglosajones se utilizan unidades del sistema Troy y el sistema Avoirdupois que tienen como unidad básica el grano (gr).

$$1 \text{ lb (avp)} = 16 \text{ oz} = 7\,000 \text{ gr} = 453,592\,37 \text{ g}$$

$$1 \text{ lb (troy)} = 12 \text{ oz} = 5760 \text{ gr} = 373,2417216 \text{ g}$$

Desde el punto de vista de la Metrología Legal las unidades de masa no pertenecientes al SI no se permiten para la graduación de las escalas de los instrumentos de pesar, con excepción del carat (ct), que se utiliza para las mediciones de la masa de los metales y las piedras preciosas y la tonelada (t).

$$1 \text{ ct} = 0,2 \text{ g}$$

$$1 \text{ t} = 1\,000 \text{ kg}$$

### Ejercicio 1. Realice las siguientes conversiones

1.  $24,8 \text{ hg} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ g}$

5.  $23,4 \text{ dag} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cg}$

2.  $255 \text{ mg} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cg}$

6.  $92 \text{ dg} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ g}$

3.  $210 \text{ cg} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ g}$

7.  $17 \text{ dag} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ hg}$

4.  $2\,400 \text{ dg} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ hg}$

8.  $870 \text{ g} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ hg}$

9. 64 oz = \_\_\_\_\_ lb

13 2 T = \_\_\_\_\_ lb

10 4 T = \_\_\_\_\_ lb

14. 2 lb = \_\_\_\_\_ oz

11. 3 lb = \_\_\_\_\_ oz

15. 128 oz = \_\_\_\_\_ lb

12 10 lb = \_\_\_\_\_ oz

15. 80 oz = \_\_\_\_\_ lb

### **Diseminación de la unidad de masa:**

Diseminar la unidad de masa, significa transferir el valor de masa del prototipo internacional del kilogramo hasta los instrumentos ordinarios, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones

### **Jerarquía de los patrones de masa:**

En la recomendación OIML R111 pueden encontrarse los diferentes límites de tolerancia para la exactitud de distintas masas patrón en las categorías Ei, Fi y Mi . La calidad de la medición está caracterizada por la incertidumbre de la misma.

Es evidente la conexión histórica entre el patrón de la unidad de masa y de la unidad de longitud; pero mientras la longitud y muchas otras unidades cuentan con patrones que se definen a partir de las constantes físicas fundamentales, la masa aun permanece referida a una medida material.

Muy serias investigaciones se han desarrollado para referir la unidad de masa, por ejemplo, al número de Avogadro pero la exactitud y la estabilidad con que se logra reproducir la unidad no supera la que la que ofrece el prototipo internacional. Desde hace aproximadamente 10 años, algunos de los laboratorios metrológicos más prestigiosos entre ellos el NIST y el PTB, y también el BIPM entre otros vienen desarrollando una tecnología muy compleja para lograr reproducir la unidad de masa a partir del efecto JOSEPHSON.

Los resultados más recientes reportados en el año 1999 en Brasil por el Señor Quinn del BIPM aseguran más temprano que tarde una nueva definición del kilogramo.

En 1889 se decidió tomar como patrón de la unidad, la masa de un cuerpo cilíndrico de 39 mm de diámetro y 39 mm de altura, construido de una aleación de platino e iridio(90% platino-10

% iridio) con una densidad aproximada de 21 500 kg/m<sup>3</sup> .

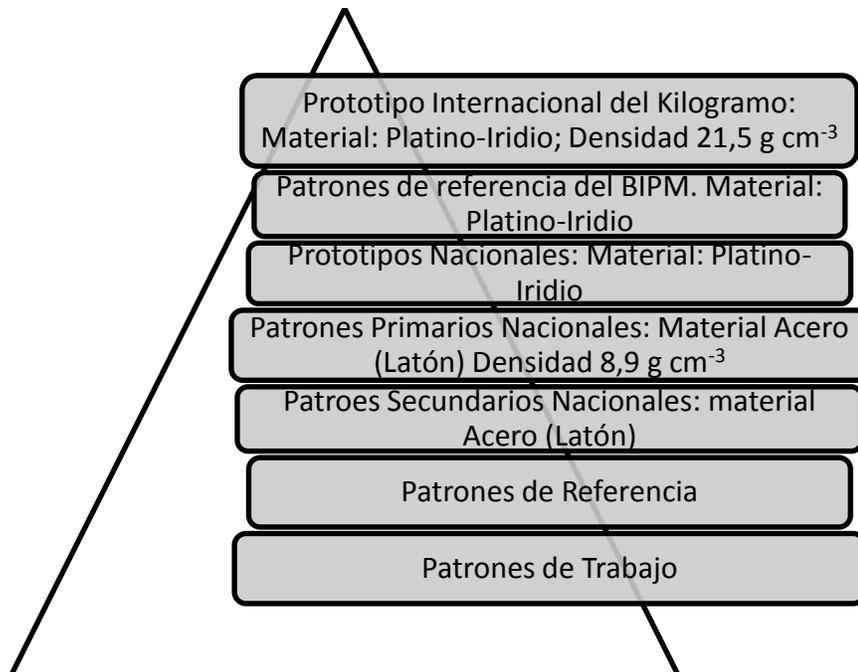
Se considera como el único patrón primario de masa. El prototipo original– kilogramme des Archives, fabricado en la misma época que el mètre des Archives, se considera patrón histórico.

El prototipo internacional del kilogramo seleccionado en 1883 entre 3 prototipos similares designados K1, K2 y K3, está acompañado permanentemente por los otros 2 que constituyen sus patrones testigos; previamente no seleccionados.

Además de los 3 iniciales, en 1889, de una misma colada, se prepararon: el kilogramo internacional, cuatro testigos y patrones nacionales (originalmente 40 de ellos para llenar las necesidades de los países signatarios de la Convención del Metro).Estos, y los fabricados subsecuentemente por el BIPM, son a veces conocidos como “kilogramo Nox” donde “x” es el número, de identificación de uno de esos patrones.

Debido a que la definición y construcción de la unidad se basan en un artefacto, la unidad nunca podrá ser transferida con mayor exactitud que la que permita la comparación de masas con el prototipo internacional de masa.

Considerando las limitaciones de las comparaciones, se ha estructurado una jerarquía de patrones, con las siguientes características obligadas, que se expone a continuación:



El patrón actual del kilogramo permite medir la masa con una exactitud de 1 en 10<sup>8</sup>. La finalidad de disponer de patrones es medir con exactitud la masa de los cuerpos; por ello es necesario disponer de múltiplos y submúltiplos del kilogramo con los cuales se puedan

determinar exactamente las masas deseadas.

Después de 1920 y hasta 1974 se han construido otros 23 prototipos, numerados del 41 al 63, que se mantienen en posesión de otros países también en calidad de patrones nacionales.

Los prototipos nacionales se conectan entonces en el ámbito nacional con los patrones primarios, secundarios, de referencia y de trabajo construidos de acero inoxidable u otros materiales no magnéticos, y de ahí, a los instrumentos ordinarios.

Seguidamente se describen brevemente algunos de los métodos de calibración que se utilizan para lograr la disseminación de la unidad de masa.

### **Métodos de calibración por comparación:**

#### Comparación en series cerradas (CSC)

Este método consiste en comparar varios patrones de igual valor nominal normalmente 3 (comparación triangular) o 4 (cuadrangular). Todos los patrones se comparan entre sí y uno de ellos se utiliza como patrón de referencia. Los valores de masa de los patrones que se calibran se obtienen a través de las soluciones de. Un sistema de ecuaciones lineales.

Veamos un ejemplo:

Si tienen dos patrones T1 y T2 que se calibran mediante una comparación triangular con un patrón de referencia S. El esquema de pesadas se puede representar del modo siguiente:

	S	T1	T2
d1	1	-1	0
d2	1	0	-1
d3	0	1	-1

d1, d2 y d3 son los resultados de las comparaciones. Los números 1 y -1 indican la participación de las pesas en la comparación. El número 0 indica que la pesa no participa.

El sistema se compone de 3 ecuaciones, 2 incógnitas. La solución del sistema permite obtener los valores para T1 y T2 a partir del valor del patrón S.

#### Comparación directa (CD)

La comparación directa consiste en comparar dos pesas de igual valor nominal, una de ellas de referencia, que se colocan alternativamente en el mismo platillo de una balanza.

Al aplicar la ecuación (11) nos damos cuenta que se requiere determinar las densidades del aire y de las pesas que se comparan, así como la diferencia entre las indicaciones de la balanza comparadora.

La densidad del aire se determina mediante la expresión:

$$\rho_a = \frac{0,348444 \cdot P - H(0,00252t - 0,020282)}{273,15 + t}$$

Donde P, H y t son los valores medidos de la presión barométrica, la humedad relativa y la temperatura del aire en el momento de la medición.

### Esquemas de subdivisión y multiplicación (ESM)

Hasta aquí hemos visto la comparación de patrones de 1kg; pero para determinar la masa de un cuerpo en el rango de 10<sup>-10</sup> a 10<sup>6</sup> kg no basta sólo con los patrones de 1 kg, sino que se necesita representar también como medidas materializadas a los diferentes múltiplos y submúltiplos del kilogramo, para cuyos valores nominales se emplean los números preferidos 1, 2 y 5, de modo tal que la combinación entre ellos permita representar todos los valores posibles en cada década, desde 1 mg hasta 50 kg. Por ejemplo en la década de 100 g a 1 kg es suficiente construir sólo 4 patrones de 100g, 200 g, 200g y 500 g.

La comparación consiste en aplicar los esquemas de subdivisión (descendiendo hacia los submúltiplos) o multiplicación (ascendiendo hacia los múltiplos) de 1 kg. Un ejemplo de esquema de subdivisión puede ser el que se muestra a continuación con 5 patrones desconocidos y 5 comparaciones de masa en la década de 1 kg a 100 g:

Comparaciones	1 kg	500 g	200 g	200' g	100 g	100 * g
X1	-1	1	1	1	1	0
X2	0	-1	1	1	1	0
X3	0	0	-1	1	0	0
X4	0	0	0	-1	1	0
X5	0	0	0	0	-1	1

Partiendo de que la masa de 1 kg es un valor conocido y que se desconoce el resto de las masas que participan, el esquema conforma un sistema de ecuaciones lineales con 5 ecuaciones y cinco incógnitas cuyas soluciones corresponden precisamente a los valores de las masas desconocidas. La primera ecuación del sistema se puede escribir:

$$x_1 = -1 \text{ kg} + (500 \text{ g} + 200 \text{ g} + 200' \text{ g} + 100 \text{ g})$$

El resto de las ecuaciones se puede escribir por analogía y las soluciones se encuentran

resolviendo el sistema.

En el esquema la  $x_i$  representan los resultados de las pesadas de comparación, el cero significa que la masa no participa y los signos, que las masas del mismo signo se cargan en el mismo plato de la balanza al mismo tiempo.

## Patrones de masa y pesas

La materialización de la unidad de masa, sus múltiplos y submúltiplos, se conocen con el nombre de patrones de masa o pesas.

Desde el punto de vista de la Metrología Legal existe una diferencia importante entre los patrones de masa y las pesas que se admiten a la verificación (normalmente se dice sólo pesas). La diferencia consiste en que para los patrones de masa no se establecen prescripciones legales de ningún

Tipo, en cambio para las pesas sí se exigen un grupo importante de requisitos referidos a las características físicas y metrológicas, los cuales conforman el contenido fundamental de la OIML R111:94.

Como veremos más adelante las exigencias metrológicas de la R111 se refieren a la masa convencional. El uso de los valores convencionales reduce las comparaciones de masa a un proceso de pesada, en cambio el uso de los valores reales de la masa exige la determinación de la densidad del aire y el volumen de las pesas o la densidad de su material. Por esa razón el uso de las pesas, siempre que sea posible, es mucho más conveniente que el uso de patrones de masa.

## Valor de la masa de una pesa

Cuando nos referimos a la masa ( $M$ ) de una pesa debemos considerar los 3 componentes siguientes:

$$M = VN + DVN \pm U$$

La primera componente  $VN$  es el valor nominal, que es el valor deseado, libre de errores, o el valor que la pesa representa sin abordar las cuestiones relacionadas con la exactitud. Uno puede referirse normalmente a la masa de una pesa del modo siguiente: “necesito calibrar una pesa de 1 kg”; pero evidentemente sin tener en cuenta su desviación.

La segunda componente  $DVN$  es precisamente la desviación que tiene el valor de masa de la pesa con respecto al valor nominal, generalmente determinada en una comparación con un patrón de referencia.

Si decimos que la masa de una pesa de 1 kg es 1,000 002 kg estamos diciendo también que la  $DVN$  es de 2 mg.

La tercera componente  $U$  es la incertidumbre en la determinación de la  $DVN$ . La incertidumbre

especifica un intervalo de valores con límites positivo y negativo simétricos alrededor de la DVN dentro del cual es probable encontrar el valor de la DVN cada vez que se repita su determinación. La probabilidad determina el ancho del intervalo. Por ejemplo, si la masa del patrón de 1 kg que es de 1,000 002 kg fue determinada con una incertidumbre de  $\pm 2$  mg para un nivel de confianza de un 95 %, es muy probable que de cada 100 determinaciones de la masa del patrón se encuentren 95 resultados dentro de los límites de los valores 1,000 000 y 1,000 004 kg.

## Resultado de la pesada

Es el valor indicado por un instrumento de pesar. A diferencia de la masa, el resultado de la pesada no es un valor constante ya que depende de la densidad del aire, el objeto que se pesa y el material de las pesas que se comparan.

### Valor convencional del resultado de la pesada en el aire

En la metrología legal, las pesas son divididas en clases límites de tolerancia con respecto a la desviación de la masa convencionalmente verdadera de las pesas respecto a su valor nominal. Como valor nominal de las pesas se define su masa convencional y no su masa.

Se define la masa convencional de una pesa como la masa de un cuerpo de densidad 8000 kg/m<sup>3</sup> que equilibra a la pesa, durante la comparación de ambos en el aire de Densidad 1,2 kg/m<sup>3</sup> a una temperatura de 20 °C.

Aplicando la ecuación (10) resultaría que la masa convencional de una pesa de masa  $m$  y densidad  $\rho$  a una temperatura cualquiera es:

$$m_c = m \cdot \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right)}{\left(1 - \frac{1,2}{8000}\right)} = m \cdot \frac{\rho - \rho_a}{\rho \cdot 0,99985}$$

Siempre que la densidad del material de la pesa sea  $\rho = \rho_c$  y la temperatura de medición 20 °C, el valor convencional del resultado de la pesada de una pesa en el aire es igual a su masa.

El valor de la masa convencional fue introducido para reducir la comparación de masas a un proceso puro de pesada. El valor de la masa convencional tiene por tanto sentido práctico, sólo en el caso que la densidad de la masa comparada pueda ser definida. Tal situación es concebible en un área en la cual no se requiere comparaciones de masas desconocidas. La certificación de pesas, balanzas y básculas corresponde a este caso, ya que la densidad de las pesas propiamente dichas, así como la densidad de las pesas internas de comparación de balanzas y básculas, pueden ser fabricadas de un material de densidad apropiada.

### 3. LA OIML R 111. INTERPRETACIÓN Y APLICACIÓN.

Para cualquier empresa de servicio que se dedique a la calibración de instrumentos de pesar es conveniente poder interpretar el significado de la OIML R111 y su aplicación práctica, ya que, como se ha explicado antes, durante la calibración de instrumentos de pesar es más conveniente emplear las pesas cuyas características físicas y metrológicas se especifican en la R111.

También en la R111 se establece la clasificación de las pesas, aspecto que está estrechamente ligado a la calibración de los instrumentos de pesar. En la práctica resulta muy cómodo comprender la relación entre las clases de exactitud de las pesas que se requieren para calibrar instrumentos de pesar, digamos por ejemplo que para calibrar instrumentos de 3 000 divisiones se emplean patrones M1

Si por otra parte la empresa de servicio recibe a su vez los servicios de calibración externos para obtener la trazabilidad de sus instrumentos patrones, la interpretación y aplicación de la R111 le servirá entonces para evaluar la calidad de los servicios externos.

Sin embargo la R111 tiene la limitación de que no contempla los procedimientos de calibración; aspecto en el que se trabaja en la actualidad.

#### Uso de las pesas

Las pesas pueden ser utilizadas:

- para la verificación de los instrumentos de pesar,
- para la verificación de pesas de una clase de exactitud inmediatamente inferior o menor.
- conjuntamente con los instrumentos de pesar.

El uso cada vez más frecuente de instrumentos de pesar electrónicos disminuye cada vez más la necesidad del uso de éstas conjuntamente con los instrumentos de pesar.



La clase de exactitud de las pesas que se requieren para la verificación de los instrumentos de pesar se determina a partir de la exactitud de los instrumentos de pesar.

### Clasificación

Las pesas con valores nominales en el rango de 1 mg a 50 kg se clasifican en 7 clases de exactitud denominadas E1, E2, F1, F2, M1, M2 y M3, en dependencia del cumplimiento de determinadas exigencias metrológicas, entre ellas los límites tolerados para la desviación con respecto al valor nominal, y exigencias con respecto a sus características físicas, entre ellas las propiedades físicas del material con que se fabrican. Las pesas mayores que 50 kg se clasifican particularmente de acuerdo a lo especificado en la OIML R 47.

### Exigencias metrológicas

Para que una pesa pueda ser certificada según alguna de las clases especificadas en la R111 es imprescindible que la desviación con respecto a su valor nominal no exceda de los valores máximos permisibles especificados en la tabla y que la incertidumbre en la determinación del valor de masa no exceda de 1/3 de los valores tabulados. Es importante tener en cuenta que todos los valores se refieren a la masa convencional y que la incertidumbre de medición a que se refiere es la incertidumbre expandida con factor de seguridad o cobertura igual a  $k=2$ .

Valor nominal	Error máximo permisible (mg)						
	Clase E1	Clase E2	Clase F1	Clase F2	Clase M1	Clase M2	Clase M3
50 kg	25	75	250	750	2	7	25
20 kg	10	30	100	300	1	3	10
10 kg	5	15	50	150	500	1	5
5 kg	2,5	7,5	25	75	250	750	2
2 kg	1,0	3,0	10	30	100	300	1
1 kg	0,5	1,5	5	15	50	150	500
500 g	0,25	0,75	2,5	7,5	25	75	250
200 g	0,10	0,30	1,0	3,0	10	30	100
100 g	0,05	0,15	0,5	1,5	5	15	50
50 g	0,03	0,10	0,30	1,0	3,0	10	30
20 g	0,02	0,08	0,25	0,8	2,5	8	25
10 g	0,02	0,06	0,20	0,6	2	6	20
5 g	0,01	0,05	0,15	0,5	1,5	5	15
2 g	0,01	0,04	0,12	0,4	1,2	4	12
1 g	0,01	0,03	0,10	0,3	1	3	10

Valor nominal	Error máximo permisible (mg)						
	Clase E1	Clase E2	Clase F1	Clase F2	Clase M1	Clase M2	Clase M3
500	0,008	0,025	0,08	0,25	0,8	2,5	
200	0,006	0,020	0,06	0,20	0,6	2,0	
100	0,005	0,015	0,05	0,15	0,5	1,5	
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	0,002	0,008	0,025	0,08	0,25		
5 mg	0,002	0,006	0,020	0,06	0,20		
2 mg	0,002	0,006	0,020	0,06	0,20		
1 mg	0,002	0,006	0,020	0,06	0,20		

Veamos un ejemplo. En la tabla 1 puede verse que una pesa de valor nominal ( $m_0$ ) 1 kg certificada según la clase E<sub>2</sub> tiene una desviación máxima permisible ( $\Delta m$ ) de +1,5 mg , lo que significa que su masa ( $m$ ) satisface la condición:

$$m_0 - \Delta m < m < m_0 + \Delta m$$

Ejercicio 2.

Clasifique de acuerdo a los siguientes errores máximos permisibles la clase a la que pertenece cada pesa

Número	Pesa	Error máximo	Número	Pesa	Error máximo
1	1 kg	200 mg	6	1 mg	0,020 mg
2	2 kg	10 mg	7	5 mg	0,02 mg
3	20 kg	50 mg	8	10 mg	0,006 mg
4	5 kg	2 mg	9	500 mg	2,5 mg
5	10 kg	20 mg			

### Características físicas

Las características físicas más importantes de las pesas son:

- forma y dimensiones,
- construcción y material,

- condiciones de la superficie, y
- densidad del material.

La importancia está determinada por la influencia que pueden tener en la exactitud de la determinación de la masa y en la conservación de sus características metrológicas en el tiempo.

### Forma y dimensiones

Las pesas deben tener una forma simple para facilitar su construcción y su manipulación. Sus bordes deben ser redondeados para evitar deterioros y no deben tener hendiduras para evitar que en ellas se alojen partículas de polvo u otras, que puedan alterar su valor de masa.

Las pesas pueden adquirirse en el mercado o bien como piezas individuales o formando parte de un juego. En este último caso todas las piezas deben tener la misma forma excepto las de 1 g y menores. Las pesas de 1 g pueden tener la forma de sus múltiplos o la de sus submúltiplos.

Los submúltiplos de 1 g se construyen a partir de láminas con formas poligonales planas o de alambres cuya geometría indica el valor nominal de acuerdo con lo que se indica en la tabla siguiente:

Valor nominal (mg)	Geometría
5-50-500	pentágonal
2-20-200	cuadrada
1-10-100-1000	triangular

Los múltiplos de 1g hasta 50 kg, pueden tener forma cilíndrica o cónica con o sin cabeza u otro dispositivo conveniente para el agarre y las pesas de 5 kg y mayores pueden ser rectangulares. Las dimensiones pueden ser encontradas en las figuras del Apéndice A de la OIML R 111. Las pesas mayores de 50 kg pueden tener las más diversas formas que faciliten su manipulación con distintos sistemas de izaje (montacargas, winche, grúas), y sus dimensiones pueden encontrarse en la OIML R 47.

### Construcción y material

Las pesas cilíndricas, cónicas o rectangulares pueden construirse con o sin cavidad de ajuste, en dependencia de la clase de exactitud. Por ejemplo, las pesas de las clases denominadas E se construyen como piezas monolíticas sin cavidad de ajuste, pero las pesas de las clases denominadas F pueden o no tener cavidad de ajuste. Las pesas de

las clases denominadas M se construyen con cavidad de ajuste.

El material para la construcción de las pesas debe ser resistente a la corrosión y al desgaste y además ser antimagnético. Los valores recomendados para la susceptibilidad magnética del material en correspondencia con la clase de exactitud son los siguientes:

Clase	Susceptibilidad
E <sub>1</sub>	0,01
E <sub>2</sub>	0,03
F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub>	0,05
M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> y M <sub>3</sub>	Similar al hierro

Como la pesada se basa en la comparación de fuerzas (peso y fuerza de empuje) se debe excluir cualquier otra fuerza que modifique la condición de equilibrio que ya hemos visto antes.

Las fuerzas magnéticas tienen gran importancia sobre todo cuando se emplean instrumentos electrónicos. De modo que hay que fijar los valores de susceptibilidad que pueden evitar tales influencias de modo que se empleen materiales adecuados en la construcción de las pesas.

Los valores fijados para las clases parten de suponer que durante la pesada puede crearse un campo magnético de intensidad  $H=1 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-1}$  y un gradiente de  $0,5 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

### Condiciones de la superficie

La superficie de las pesas debe tener un acabado tal que no se produzcan errores excesivos por incrustaciones en condiciones normales de uso. Debe ser una superficie lisa y no porosa. Los valores límites de rugosidad superficial (altura promedio entre pico y valle  $R_z$ ) en correspondencia con la clase de exactitud son los siguientes:

Clase	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	0,5	1	2	5

Las pesas M1, M2 y M3 deben tener un acabado superficial similar al del hierro fundido moldeado en arena, sin poros ni grietas, lo que puede lograrse aplicando una pintura adecuada.

## Densidad

Para comprender las exigencias relacionadas con la densidad del material de las pesas retomemos lo referente a su masa convencional. Según la ecuación (17) en una comparación de masas realizada en el aire hay que tener en cuenta la densidad del material con que se construyen las pesas que se comparan y la densidad del aire.

El concepto de masa convencional fue introducido en la Metrología Legal como ya hemos mencionado para reducir las determinaciones de masa a un proceso de pesada pura en ambientes con densidades del aire que no excedan de  $\pm 10\%$  del valor convencional de  $1,2 \text{ kg/m}^3$  (esta condición se cumple para laboratorios ubicados hasta una altura de  $900 \text{ m}$  sobre el nivel del mar). En la certificación y verificación de las pesas esto sólo tiene sentido si las pesas se fabrican de un material cuya densidad no exceda del valor convencional de  $8000 \text{ kg/m}^3$  en una cantidad definida.

Esa cantidad se define a partir del criterio de que cuando una pesa se compara con otra de referencia cuya densidad es de  $8000 \text{ kg/m}^3$  (cualquier patrón certificado según el valor de la masa convencional o alguna de las clases referidas en la OIML R 111), las variaciones en la densidad del aire de  $\pm 10\%$  alrededor del valor convencional de  $1,2 \text{ kg/m}^3$  que puedan producirse en el momento de la comparación, no provoquen variaciones de la masa en el resultado de la comparación superiores a  $1/4$  de la desviación máxima permisible para la pesa que se compara, lo que puede expresarse matemáticamente de la forma:

$$\left| \frac{\Delta m_c}{m_c} \right| \leq \frac{1}{4} \Delta mp$$

Las desviaciones relativas de la masa de una pesa respecto a su masa convencional, debidas a la diferencia entre la densidad real del material y la densidad convencional se pueden obtener a partir de la siguiente expresión:

$$\left| \frac{\Delta m_c}{m_c} \right| \leq \left| \frac{m_r - m_c}{m_c} \right| = \left| \left( \frac{\rho_r - \rho_c}{\rho_r \cdot \rho_c} \right) (\rho_{\text{aire}} - 1,2) \right|$$

Los valores de densidades reales para el material de las pesas que permiten satisfacer la condición expresada en la ecuación (19) se indican en la tabla siguiente:

Valor nominal	□ min, □ Max ( $10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ )					
	Clase	Clase	Clase	Clase	Clase	Clase
$\geq 100$	7,934...	7,81....	7,39....	6,4....1	$\geq 4,4$	$\geq 2,3$
50 g	7,92....	7,74....	7,27....	6,0....1	$\geq 4,0$	
20 g	7,84....	7,50....	6,6....1	4,8....2	$\geq 2,6$	

10 g	7,74....	7,27....	6,0....1	≥ 4,0	≥ 2	
5 g	7,62....	6,9....1	5,3....1	≥ 3,0		
2 g	7,27....	6,0....1	≥ 4,0	≥ 2,0		
1 g	6,9....9,	5,3....1	≥ 3,0			
500	6,3....1	≥ 4,4	≥ 2,2			
200	5,3....1	≥ 3,0				
100	≥ 4,4	≥ 2,3				
50 mg	≥ 3,4					
20 mg	≥ 2,3					

### Calibración de pesas

#### Proceso de calibración:

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

- a. 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.
- b. Calentamiento de la balanza en el centro y los lados previo a iniciar con los ciclos de medición
- c. Realización de 3 ciclos de medida según la secuencia patrón-muestra-patrón (p-m-p).
- c. Estimación del valor de masa real y a partir de esto se realiza la determinación del valor convencional de las masas a calibrar y estimación de sus incertidumbres asociadas.
- d. En caso de realizar limpieza en la pesa calibrada se vuelve a realizar el proceso de calibración, después del tiempo de estabilización.
- e. Se presentan los resultados antes del ajuste y después del ajuste

#### Cálculos

- **Masa real de la muestra ( $m_m$ ):** se determina mediante la ecuación:

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

Donde:

$m_p$ : Masa real patrón

$\delta m_p$ : deriva patrón

$\rho_a$ : Densidad del aire

$V_m$ : Volumen de la muestra

$V_p$ : Volumen del patrón

$\bar{I}_{m-p}$ : Media de diferencia de indicación

$\delta e$ : Excentricidad

- **Valor de masa real de patrón:** es el valor real en el momento de su calibración, dado en su certificado de calibración según la expresión.

$$m_p = m_n + e_p$$

(3)

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

- **Deriva del patrón:** se considera que su esperanza matemática es cero pero si atribuye a la incertidumbre.
- **Densidad del aire:** se calcula partiendo de la ecuación recomendada por el CIPM-2007 para la determinación del aire húmedo propuesta por Giacomo de forma actualizada. Se calcula mediante la expresión siguiente [5]:

$$\rho_a = \frac{pM_a}{zRT} \left[ 1 - x_w \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right]$$

(4)

Donde:

p: Presión atmosférica en Pa

Ma: Masa molar de aire seco 28,965 46 x 10<sup>-3</sup> kg mol<sup>-1</sup>

Mv: Masa molar de agua. 0,01801528 kg mol<sup>-1</sup>

R: Constante de los gases. 8,314 472 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Z: Factor de compresibilidad

T: Temperatura del aire en K

xv: Fracción molar de vapor de agua.

Para el cálculo de la fracción molar de vapor de agua se utiliza la siguiente ecuación.

$$x_v = hf_{(p,t)} \frac{p^{sv(t)}}{p}$$

(5)

Donde:

h: Humedad relativa.

p: Presión del aire en Pa

psv(t): Presión de vapor saturado en el aire.

f : Factor de desempeño.

Para el cálculo del vapor saturado en el aire se utiliza la siguiente ecuación

$$p_{sv_t} = 1^{(AT^2+BT+C+\frac{D}{T})}$$

(6)

Donde:

A: 1,237 884 7 X10-5 K-2

B: -1,912 131 6 X10-2 K-1

C: 33,937 110 47

D: -6,343 164 5 X103 K

T: Temperatura del aire en K

Para el cálculo del factor de desempeño se utiliza la siguiente ecuación.

$$f_{(p,t)} = \alpha + \beta p + \gamma^2$$

(7)

Donde:

$\alpha$ : 1,000 62

$\beta$ : 3,14 x 10-8 Pa-1

$\gamma$ : 5,6 x 10-7 K-2

p: Presión del aire en Pa

t: Temperatura del aire en °C

Para el cálculo de factor de compresibilidad (z) se utiliza la siguiente ecuación

$$Z = 1 - \frac{P}{T} \cdot [(a_o + a_1 t + a_2 t^2) + (b_o + b_1 t) \cdot x_v + (c_o + c_1 t) x_v^2] + \left(\frac{P}{T}\right)^2 \cdot (d + e x_v^2)$$

(8)

Donde:

p: Presión atmosférica Pa

t: Temperatura del aire en °C

a0:  $1,581\ 23 \times 10^{-6}$  K Pa-1

a1:  $-2933\ 1 \times 10^{-8}$  Pa-1

a2:  $1,1043 \times 10^{-10}$  K-1 Pa-1

b0:  $5,707 \times 10^{-6}$  K Pa-1

b1:  $-2,051 \times 10^{-8}$  Pa-1

c0:  $1,989\ 8 \times 10^{-4}$  K Pa-1

c1:  $-2,376 \times 10^{-6}$  Pa-1

d:  $1,83 \times 10^{-11}$  K<sup>2</sup> Pa-2

e:  $-0,765 \times 10^{-8}$

T Temperatura del aire en K

- **Volumen de la muestra:** puede obtenerse de valores tabulados de la densidad en función del material. . Se calcula mediante la siguiente expresión.

$$V_m = \frac{m_n}{\rho_m}$$

Donde:

$m_n$ : Valor nominal de masa de muestra

$\rho_n$ : Densidad de la muestra

Material	Densidad asumida (kg/m <sup>3</sup> )	Incertidumbre (kg/m <sup>3</sup> )
Platino	21400	150
Níquel plata	8600	170
Latón	8400	170
Acero inoxidable	7950	140
Acero carbono	7700	200
Hierro	7800	200

Hierro fundido (blanco)	7700	400
Hierro fundido (gris)	7100	600
Aluminio	2700	130

- **Volumen del patrón:** puede obtenerse de valores tabulados de la densidad en función del material. Se calcula mediante la siguiente expresión.

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_p}$$

Donde:

$m_p$ : Valor nominal de masa del patrón

$\rho_p$ : Densidad del patrón

Tanto para la muestra como para el patrón, si la calibración se realiza a una temperatura,  $t$ , distinta de la temperatura de referencia,  $t_0$ , se debe aplicar la corrección por dilatación del volumen.

$$V = V_0 * [1 + \alpha * (t - t_0)]$$

Donde:

$\alpha$ : es el coeficiente de dilatación lineal

Material	Coeficiente de dilatación lineal
Platino	0,000026
Níquel plata	0,000069
Latón	0,00004
Acero inoxidable	0,000045
Acero carbono	0,000018
Hierro	0,000011
Hierro fundido (blanco)	-

Hierro fundido (gris)	0,00004
Aluminio	0,000069

- **Indicación media:** A partir de los valores de indicación leídos:  $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$  se calcula el valor medio de indicación del patrón, de la siguiente forma.

$$\bar{I}_p = \frac{I_{p1} + I_{p2}}{2}$$

Se halla la diferencia entre el valor medio de la muestra y el del patrón para cada ciclo.

$$I_{m-p} = I_m - I_p$$

(13)

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

- **Excentricidad:** se considera despreciable si la muestra y el patrón son situadas en el centro del dispositivo receptor de carga, pero sí contribuye a la incertidumbre.

Nota: en caso de tratarse de un juego de pesas los instrumentos a ser calibrados, esta prueba se realiza únicamente con la pesa de capacidad nominal mayor

- **Masa convencional:** se calcula a partir de su masa real mediante la expresión que se presenta a continuación.

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

Donde:

$$\rho_0: 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{ref}: 8000 \text{ kg/m}^3$$

### Ejercicio 3

#### Parte 1

Instrumento:	Juego de Pesas
Nº de serie	50 KJ
Código	2-002518
Ubicación	Laboratorio de Bacteriología
Capacidad nominal	100 g a 2000 g
Temperatura Inicial °C	21,5 °C
Temperatura Inicial °C	21,7 °C
Humedad relativa inicial	52 %
Humedad relativa final	56 %
Presión Atmosférica inicial	883 hPa
Presión Atmosférica final	883 hPa

Las pesas tanto patrón como calibrando son de acero inoxidable

Valor Nominal	Masa convencional de la Pesa Patrón ( $m_{cp}$ )	Incertidumbre de la pesa patrón $u(m_{cp})_C$	Temp	Humedad	Presión
g	g	g	°C	%	Pa
100	99,999889	0,000053	21,5	50	88300
200	199,99988	0,0001	21,4	51	88300
200	199,9998	0,0001	21,5	50	88300
500	499,99971	0,00027	21,7	56	88300
1000	999,99921	0,00053	21,7	53	88300
2000	2000,0028	0,0033	21,6	51	88300

I Ciclo

<b>Patrón (<math>I_{p1}</math>)</b>	<b>Pesa (<math>I_{m1}</math>)</b>	<b>Patrón (<math>I_{p2}</math>)</b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
100,00	100,02	100,02
200,00	200,00	200,00
199,99	199,98	200,01
500,00	500,01	499,99
1000,00	1000,03	1000,00
2000,00	2000,06	2000,01

II Ciclo

<b>Patrón (<math>I_{p2}</math>)</b>	<b>Pesa (<math>I_{m2}</math>)</b>	<b>Patrón (<math>I_{p2}</math>)</b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
100,00	100,02	100,00
200,00	200,00	200,00
199,99	200,01	200,01
500,01	500,00	500,01
1000,01	1000,03	1000,00
2000,01	2000,07	2000,00

III Ciclo

<b>Patrón (<math>I_{p3}</math>)</b>	<b>Pesa (<math>I_{m3}</math>)</b>	<b>Patrón (<math>I_{p3}</math>)</b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
100,00	100,00	100,00
200,00	200,00	200,00
199,99	199,99	200,00
500,01	500,02	500,01
1000,00	1000,02	1000,01
2000,00	2000,09	2000,03

Condiciones finales

Temp	Humedad	Presión Atmosférica
°C	%	Pa
21,4	50	88300
21,5	51	88300
21,6	52	88300
21,7	54	88300
21,6	52	88300
21,7	56	88300

Densidad del aire

$\rho_{\text{aire1}}$	1,0429	±	0,0008	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\text{aire}}$	0,0010429	±	8,15796590E-07	g/cm <sup>3</sup>

1. Calcule lo siguiente

Valor Nominal	Indicación en media $I_{m-p}$	Volumen de muestra	Volumen de patrón	Masa Real de Muestra $M_m$
g	g	g	g	g
100				
200				
200				
500				
1000				
2000				

Valor Nominal	Masa convencional de muestra $m_{cm}$	Error
g	g	g
100		
200		
200		
500		
1000		
2000		

## Parte 2

Instrumento:	Juego de Pesas
Fabricante	Rice Lake
Modelo	—
Nº de serie	50 KJ
Código	2-002518
Ubicación	Laboratorio de Bacteriología
Capacidad nominal	1 g a 50 g
Temperatura Inicial °C	21,7 °C
Temperatura Inicial °C	21,8 °C
Humedad relativa inicial	61 %
Humedad relativa final	57 %
Presión Atmosférica inicial	884 hPa
Presión Atmosférica final	883 hPa

Las pesas tanto patrón como calibrando son de acero inoxidable

Valor Nominal	Masa convencional de la Pesa Patrón ( $m_{cp}$ )	Incertidumbre de la pesa patrón $u(m_{cp})_c$	Temp	Humedad	Presión
g	g	g	°C	%	Pa
2	2,000013	0,000013	21,8	60	88400
2	2,000009	0,000013	21,8	58	88400
5	5,000006	0,000017	21,8	56	88400
10	10,000003	0,00002	21,9	60	88400
20	20,000001	0,000027	21,7	52	88300
20	20,000007	0,000027	21,7	51	88300
50	49,99981	0,000033	21,5	51	88300

I Ciclo

<b>Patrón (I<sub>p1</sub>)</b>	<b>Pesa (I<sub>m1</sub>)</b>	<b>Patrón (I<sub>p2</sub>)</b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
2,00	2,01	1,99
2,00	2,00	2,00
5,00	5,00	5,00
10,00	9,99	10,00
20,00	20,00	20,00
20,00	20,00	20,00
49,99	49,98	50,00

### II Ciclo

<b>Patrón (I<sub>p2</sub>)</b>	<b>Pesa (I<sub>m2</sub>)</b>	<b>Patrón (I<sub>p2</sub>)</b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
2,00	1,99	2,00
2,00	2,00	2,00
4,99	5,00	5,00
10,00	10,00	10,00
20,00	20,01	20,00
20,00	19,99	20,00
50,00	50,00	49,99

### III Ciclo

<b>Patrón (I<sub>p3</sub>)</b>	<b>Pesa (I<sub>m3</sub>)</b>	<b>Patrón (I<sub>p3</sub>)</b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
2,00	1,99	2,00
2,00	2,00	2,00
5,00	4,99	5,00
10,00	10,00	10,00
20,00	20,00	20,00
20,00	20,01	20,00
49,99	50,01	50,00

### Condiciones finales

Temp	Humedad	Presión Atmosférica
°C	%	Pa
21,8	58	88400
21,8	56	88400
21,9	59	88400
22	60	88400
21,7	51	88300
21,6	50	88300
21,5	51	88300

1. Calcule lo siguiente

Valor Nominal	Indicación en media $I_{m-p}$	Volumen de muestra	Volumen de patrón	Masa Real de Muestra $M_m$
g	g	g	g	g
2,00				
2,00				
5,00				
10,00				
20,00				
20,00				
50,00				

Valor Nominal	Masa convencional de muestra $m_{cm}$	Error
g	g	g
2,00		
2,00		
5,00		
10,00		
20,00		
20,00		
50,00		

#### 4. INSTRUMENTOS DE PESAR UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA.

En los procesos productivos se requieren instrumentos para pesar grandes cantidades de materias primas, en ocasiones con posibilidades de registrar los resultados, mezclarlas de manera continua o discontinua para elaborar formulaciones de producto, monitorear y controlar el proceso, controlar la calidad de las materias primas y el producto final en la línea o el laboratorio, dispensar, envasar, o simplemente entregar el producto a granel conociendo con suficiente exactitud la cantidad de material, entre otras muchas aplicaciones.

También en una industria debe contarse con patrones de masa o preferiblemente pesas certificadas según las clases de OIML R111 fundamentalmente para calibrar los instrumentos.

Los instrumentos de pesar en general, e incluso en sus variantes para aplicaciones industriales, tienen una amplia incidencia en el comercio, terreno que ha despertado en los últimos años el interés de los empresarios y los gobiernos para que se empleen modelos de instrumento que demuestren su conformidad con ciertos requisitos técnicos y metrológicos que puedan ser exigidos por los clientes.

Con el objetivo de armonizar requisitos en el ámbito mundial, la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) ha puesto en los últimos 5 años a la disposición de los países miembros un grupo de Recomendaciones Internacionales (RI) actualizadas que son documentos técnicos de mucha utilidad tanto para las Autoridades Metrológicas Nacionales, como para los fabricantes y los usuarios de instrumentos de pesar. Las OIML RI pueden servir de punto de partida para organizar y ejecutar el control metrológico y la calibración de los instrumentos.

Según el modo de operación, la gran variedad de instrumentos de pesar que conocemos hoy puede agruparse en dos grandes categorías:

- instrumentos no automáticos.
- instrumentos automáticos.



Los instrumentos cuyo funcionamiento se considera no automático son los que durante la pesada requieren de la intervención del operador, ya sea para colocar o retirar el objeto a pesar del receptor de carga, o para obtener el resultado de la pesada.

Los conceptos fundamentales relacionados con los instrumentos no automáticos; así como los requisitos metrológicos que se establecen en el ámbito internacional por la OIML pueden ser encontrados en la RI 76 "Instrumentos de pesar de funcionamiento no automático".

Los instrumentos automáticos, son los que no requieren la intervención del operador durante el proceso de pesada, ya sea para colocar la carga o para obtener el resultado. Los instrumentos automáticos surgen a partir de la necesidad histórica de automatizar los procesos productivos y los servicios. Su uso práctico permite disminuir el tiempo requerido para pesar grandes cantidades de mercancías y en consecuencia, elevar la productividad de los procesos de pesada, así como mejorar las condiciones de trabajo de los operarios, aumentar la eficiencia, disminuir los costos, pesar el 100 % de las mercancías y evitar los errores sistemáticos de operación y cálculos.

Los instrumentos automáticos se caracterizan fundamentalmente por la operación en régimen dinámico, es decir, realizar la pesada de los objetos en movimiento, aunque su construcción puede permitir la operación en régimen estático. Durante la operación automática, en régimen dinámico, los objetos que se pesan en movimiento pueden constituir tanto cargas continuas como cargas discretas.

Los instrumentos automáticos que se utilizan para pesar cargas continuas y las RI elaboradas por la OIML correspondientes se mencionan en la tabla siguiente.

<b>Instrumento</b>	<b>Recomendación internacional</b>
<b>Instrumentos para ferrocarriles en movimiento</b>	<b>RI-106</b>
<b>Instrumentos totalizadores de flujo continuo</b>	<b>RI-50</b>

Los que se utilizan para pesar cargas discretas y las RI correspondientes se indican en la siguiente tabla.

<b>Instrumento</b>	<b>Recomendación Internacional</b>
Instrumentos de control	RI-51
Instrumentos de llenado gravimétrico	RI-61
Instrumentos totalizadores de flujo discontinuo	RI-107

## **Instrumentos automáticos**

### Tipos

Los tipos de instrumento y las recomendaciones internacionales de la OIML que regula las exigencias técnicas y metrológicas en cada caso fueron mencionados anteriormente.

Por su importancia nos detendremos sólo en los instrumentos totalizadores de flujo continuo. Los instrumentos se conocen habitualmente como bandas transportadoras y se construyen de modo tal que permitan pesar de modo continuo una cantidad de producto a granel que se transporta sobre una banda o estera sin interrupción de su movimiento y sin subdivisión del producto, con el objetivo de indicar la cantidad total del producto transportado en un período de tiempo.

Se emplean fundamentalmente en la industria de materiales sólidos a granel para totalizar la producción o controlar las materias primas y en los puertos de embarque para cuantificar las entregas de mercancías a granel de bajos precios debido a que la exactitud de la totalización que se logra es del orden del 1 %.

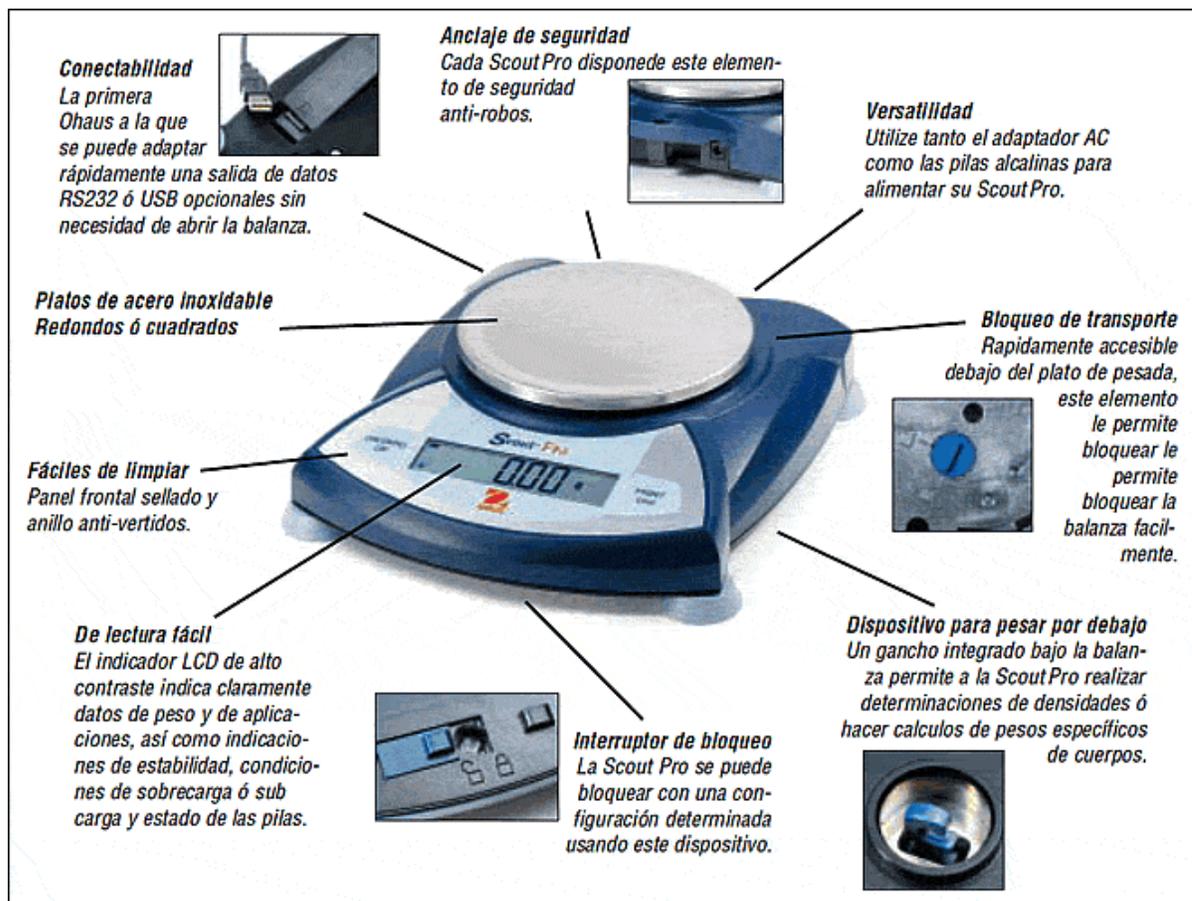
Los instrumentos que tienen unidad de pesar basada en el principio de Arquímedes, o sea equilibrio de fuerzas en el aire, en dependencia del modo en que se trasmite la fuerza para obtener la masa por unidad de longitud, pueden ser mecánicos o electrónicos. Existen otros instrumentos que tienen un principio de medición diferente, basado en la emisión y detección del efecto posterior a la emisión de determinada radiación, que puede ser electromagnética, ultrasónica e incluso ionizante.

Los instrumentos mecánicos utilizan un sistema de palancas y elementos constructivos para la totalización que en la actualidad han sido en su mayoría sustituidos por los instrumentos electrónicos o electromecánicos. Estos últimos utilizan celdas de carga o emisores y captadores de radiación ligados a los dispositivos electrónicos que elaboran las señales de salida, o y facilitan la medición y el control.

### Partes principales

Las partes y dispositivos principales son el receptor de carga o mesa de pesar que puede

ser toda la banda o parte de ella, la banda transportadora con rodillos de transporte (fijos a la estructura del instrumento) y rodillos de pesar fijos a la unidad de pesar, que suministra la información sobre la masa del producto, el transductor de desplazamiento que ofrece la información sobre el desplazamiento de una longitud definida de la banda o sobre la velocidad de la banda, los dispositivos de totalización y de indicación de la totalización, el dispositivo de ajuste a cero, de impresión, de indicación y regulación del Flujo expresado en unidades de masa por unidad de tiempo o en % del flujo máximo, y el dispositivo de preselección que permite prefijar un valor para la carga a totalizar, entre otros.



### Principio de medición

El principio de medición responde a la expresión siguiente:

$$M_T = \int V \cdot \frac{Q}{L} \cdot dt$$

Donde:

$M_T$ : masa de la carga totalizada

V: velocidad de la banda

Q/L: carga lineal

T: tiempo de medición

La masa total del material que pasa, al cabo de un período de tiempo, por una longitud de la estera es el resultado de la integración en ese tiempo del producto de la masa lineal, determinada por la celda de carga, y la velocidad, determinada por el transductor de desplazamiento.

### Características metrológicas

La unidad de pesar se caracteriza por una **capacidad máxima**, que es el máximo valor de carga distribuido a lo largo de la longitud de pesar que dicha unidad es capaz de pesar. Cuando la mesa de pesar es una parte de la banda, la longitud de pesar es la distancia entre dos planos imaginarios ubicados en los puntos medios de la distancia entre los rodillos de pesar extremos y los rodillos de transporte contiguos. La **carga lineal máxima** es el cociente entre la capacidad máxima y la longitud de pesar.

Cuando el instrumento opera a máxima velocidad y máxima carga lineal se alcanza la **densidad de flujo máxima** ( $Q_{max}$ ) y la máxima carga totalizada. Cuando los valores de velocidad y carga lineal son mínimos se obtiene la **densidad de flujo mínima** ( $Q_{min}$ ) y la mínima carga totalizada ( $\Sigma_{min}$ ).

Con el instrumento operando en modo de pesar el **valor de división de totalización** ( $d$ ) es la diferencia entre dos valores consecutivos indicados por los dispositivos de totalización general y parcial. Sólo si el instrumento está dotado de un modo de operación para pruebas, durante éstas el valor de división de totalización se sustituye por el valor de división de prueba que se define del mismo modo.

### **Instrumentos no automáticos (RI – 76)**

#### Tipos de instrumento

Los instrumentos de pesar no automático se clasifican de la siguiente forma:

- Graduado o no graduado.

- Con indicación automática, semiautomática o no automática.

Los instrumentos graduados son los que permiten la lectura directa del resultado de una pesada completa o parcial en unidades de masa. Los instrumentos no graduados no cuentan con una escala numerada en unidades de masa.

La inmensa mayoría de los instrumentos de pesar no automáticos que se utilizan en la actualidad no requieren del uso directo de las pesas durante la operación ya que son capaces de ofrecer directamente la indicación en unidades de masa a través de su escala graduada.

En algunos laboratorios se emplean aun instrumentos no graduados en unidades de masa, es decir que los instrumentos no entregan la indicación directamente en unidades de masa como es el caso de las balanzas mecánicas de brazos iguales.

Los instrumentos con indicación automática, son aquellos en los que se obtiene la posición de equilibrio sin la intervención de un operador. Los instrumentos con indicación semiautomática tienen un rango de indicación automática en el cual el operador interviene para alterar los límites del rango. Los instrumentos con indicación no automática son aquellos en los que la posición de equilibrio se logra enteramente a través del operador.

La mayoría de los instrumentos que utilizamos hoy (balanzas electrónicas) indican de manera automática, inmediatamente después que sobre ellos se coloca la carga que se desea pesar. Todo lo contrario sucede con los instrumentos que se diseñaban hasta la primera mitad del siglo (balanzas romanas o balanzas simples de brazos iguales) algunos de los cuales encuentran aún en la actualidad un amplio uso. En estos instrumentos la posición de equilibrio sólo se alcanza con la intervención del operador. Existe un tercer grupo de instrumentos (balanzas de abanico, básculas con gabinete y contrapesos intercambiables) que indican de manera automática sólo en una parte del rango de pesar y para lograr la indicación en el resto del rango se requiere la intervención del operador.

#### Partes y dispositivos principales

Las partes y dispositivos principales son el **receptor de carga**, donde se coloca el objeto a pesar, el **dispositivo de transmisión de la fuerza**, que transmite la señal de entrada, el **medidor de la fuerza**, que interpreta la fuerza que aplica la carga y la transmite ya sea en su forma inicial o transformada al **dispositivo indicador principal o auxiliar**, que entrega el resultado de la medición u otras informaciones posibles, el **dispositivo de nivelación**, para lograr que la fuerza se aplique en sentido normal, el **dispositivo de ajuste a cero**, que puede ser automático, semiautomático y no automático, el de selección de la tara, que puede ser aplicada en forma aditiva o sustractiva, entre otros.

## Características metrológicas

A continuación se describen algunas de las características metrológicas que más se utilizan para la comprobación de estos instrumentos.

El **rango de pesar**, es el intervalo comprendido entre la **capacidad mínima** (*Min*) y la **capacidad máxima** (*Max*). Para valores de la carga por debajo de la capacidad mínima, los resultados de la pesada pueden estar sometidos a un error relativo excesivo.

Al valor de masa correspondiente a la menor de las divisiones sucesivas de la escala se le conoce como **valor de división real de la escala** (*d*). Para los efectos de la clasificación y verificación de los instrumentos se define el **valor de división de verificación** (*e*) cuya relación con el valor de división real de la escala normalmente no excede de 1:10, de manera que:

$$e = 10^k \text{ kg}$$

donde *k* es un número entero negativo, positivo o cero. El valor de división de verificación representa la exactitud absoluta del instrumento.

La relación  $n=Max/e$  define el número de divisiones de verificación de los instrumentos que se utiliza ampliamente para determinar su calidad metrológica, ya que el mismo representa la exactitud relativa del instrumento.

Los instrumentos de pesar no automáticos frecuentemente cuentan con **dispositivos de tara**. Este es un dispositivo para ajustar la indicación a cero cuando hay carga en el receptor. Este dispositivo puede ser de dos tipos:

- Dispositivo de tara aditiva, el cual no altera el rango de pesar para cargas netas.
- Dispositivo de carga sustractiva, el cual reduce el rango de pesar para cargas netas.

## Clasificación de los instrumentos de pesar no automáticos

Los instrumentos no automáticos se clasifican en 4 clases de exactitud, cuya denominación y representación es la siguiente:

Especial	I
Alta	II
Media	III
Ordinaria	IIII

La clase especial agrupa a los instrumentos de mayor exactitud, que tienen más de 100000 divisiones de verificación. Otras balanzas de laboratorio con  $n < 100\ 000$  y los instrumentos usados para la comercialización de metales y piedras preciosas se agrupan en la clase alta. El resto de los instrumentos que se usan normalmente en el comercio se agrupan en la clase media y se fabrican fundamentalmente con 3 000 ó 5 000 divisiones. Los instrumentos de menor exactitud, con menos de 1 000 divisiones se agrupan en la clase ordinaria.

Los instrumentos que son conformes con la OIML R76 generalmente indican la clase a la que pertenecen. En la práctica si nos encontramos con un instrumento en el cual no se indica la clase, la clasificación puede realizarse, conociendo sus características metrológicas, siguiendo las especificaciones de la tabla siguiente:

Clase de exactitud	Valor de división de verificación (e)	Número de divisiones de verificación		Capacidad mínima
		$n_{min}$	$n_{max}$	
Especial (I)	$0,001\text{ g} \leq e$	50 000	sin límite	100 e
Superior (II)	$0,001\text{ g} \leq e \leq 0,05\text{ g}$ $0,1\text{ g} \leq e$	100	100 000	20 e
		5 000	100 000	50 e
Media (III)	$0,1\text{ g} \leq e \leq 2\text{ g}$ $5\text{ g} \leq e$	100	10 000	20 e
		500	10 000	20 e
Ordinaria (III)	$5\text{ g} \leq e$	100	1 000	10 e

Para instrumentos de rango múltiple, cada rango es tratado básicamente como unos instrumentos de un solo rango. En casos especiales, un instrumento puede tener rangos de pesada en las clases I y II o en las clases III y IIII.

#### Errores y errores máximos permisibles de los instrumentos de pesar de funcionamiento no automático

Durante la vida útil de un instrumento, los errores en su indicación pueden disminuirse tanto como sea posible, pero no pueden evitarse ya que se deben a un conjunto de factores que vayan a estar en mayor o menor grado siempre presentes. Entre ellos pueden mencionar:

- Las imperfecciones en el diseño y la construcción,
- Las condiciones ambientales de operación, diferentes de las condiciones de referencia.
- Los desajustes durante la operación o los ajustes incorrectos y otros factores

influyentes.

Entre estos factores influyentes que propician la conducta errática de los instrumentos, pueden mencionarse por ejemplo, la variación de los parámetros de la fuente de alimentación en los instrumentos electromecánicos y electrónicos, la falta de nivelación, la influencia de campos magnéticos, corrientes de aire, entre otras.

Las imperfecciones en el diseño y la construcción de los instrumentos son los máximos responsables de los errores que se van a producir durante la operación del instrumento cuando éste se usa adecuadamente y en las condiciones establecidas por el fabricante. Debido a ellas el instrumento no será capaz de mantener los valores asignables a sus propiedades metrológicas, durante un período de uso superior al período teórico de re calibración.

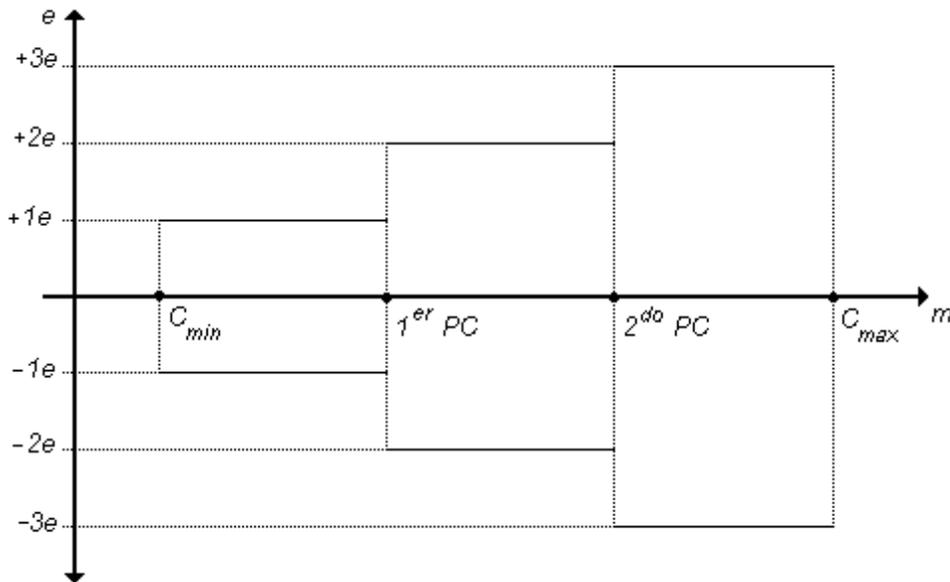
Queda claro que inevitablemente los instrumentos en la práctica no quedan exentos de error; pero también debe quedar claro que mientras menor sea el error (la diferencia entre la indicación de un instrumento y la carga aplicada), mejor será el instrumento. Por eso los fabricantes hacen todo lo posible por lograr que la conducta errática de los instrumentos tenga sus límites atendiendo a variaciones preestablecidas de los factores influyentes. Si se quiere clasificar o agrupar a los instrumentos atendiendo a sus errores, se pueden establecer límites de error que se conocen en la metrología legal como errores máximos permisibles (emp). En la OIML R76 los e.m.p se expresan en valores de división de verificación como se muestran en la tabla.

<b>Clase de exactitud</b>	<b>Carga Q expresada en divisiones de verificación</b>	<b>Errores máximos permisibles</b>
Especial (I)	$0 \leq Q \leq 50\,000\ e$	1 e
	$50\,000\ e < Q \leq 200\,000\ e$	2 e
	$200\,000\ e < Q \leq 1\,000\,000\ e$	3 e
Superior (II)	$0 \leq Q \leq 5\,000\ e$	1 e
	$5\,000\ e < Q \leq 20\,000\ e$	2 e
	$20\,000\ e < Q \leq 100\,000\ e$	3 e
Media (III)	$0 \leq Q \leq 500\ e$	1 e
	$500\ e < Q \leq 2\,000\ e$	2 e
	$2\,000\ e < Q \leq 10\,000\ e$	3 e
Ordinaria (IV)	$0 \leq Q \leq 50\ e$	1 e
	$50\ e < Q \leq 200\ e$	2 e
	$200\ e < Q \leq 1\,000\ e$	3 e

Como se observa en la tabla, el valor del error máximo permisible aumenta en la medida en que aumenta la carga. Los valores de la tabla son los que se exigen durante la

verificación periódica, para la verificación inicial los errores son la mitad de estos.

La concepción general de estos límites es que el instrumento tenga un comportamiento errático tolerable aproximadamente lineal a lo largo del rango de pesar. En la siguiente figura se muestra el comportamiento de los errores máximos permisibles de los instrumentos de pesar no automáticos, de acuerdo a la tabla anterior.



Tomemos por ejemplo un instrumento de clase III con  $n = 3\ 000$ . Al construir la curva de los errores máximos permisibles durante la verificación periódica (instrumento en uso), observamos que el error relativo máximo permisible es del orden de  $1/1000 = 0,1$

%. El error límite para el instrumento nuevo es del orden de  $1/2000 = 0,05$  %.

#### Propiedades metrológicas de los instrumentos de pesar de funcionamiento no automático.

Las propiedades metrológicas más generales de los instrumentos no automáticos son:

Sensibilidad o discriminación

Repetibilidad

Justeza o exactitud de la indicación

Excentricidad

Las cuales se detallan a continuación

- Sensibilidad y/o discriminación: La sensibilidad de un instrumento de pesar ( $S$ ) se define como la relación entre la variación de la indicación ( $\Delta I$ ) y la variación de la carga que la provoca ( $\Delta m$ ):

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta m}$$

La sensibilidad es función de la carga y se comprueba para los instrumentos con indicación no automática.

La sensibilidad de un instrumento varía con la temperatura. Esa variación se conoce como deriva de sensibilidad y se expresa en porcentaje de la indicación por °C a través de un coeficiente ( $DS$ ) que se calcula por la expresión:

$$DS = \frac{\Delta S}{\Delta T} = \frac{[\Delta I/Q]}{\Delta T} = \frac{\Delta I}{Q \cdot \Delta T}$$

donde  $\Delta S$  es la variación de la sensibilidad que es la variación de la indicación  $\Delta I$  entre la carga y  $Q$  pesada que se produce ante una variación de la temperatura  $\Delta T$ .

La discriminación es la capacidad del instrumento de reaccionar ante pequeñas variaciones de la carga y se conoce como umbral de discriminación para una carga dada, al valor de la menor variación de carga que provoca un cambio perceptible en la indicación del instrumento.

La discriminación se comprueba añadiendo o sustrayendo una pequeña carga y comparando la respuesta del instrumento con las prescripciones legales. La carga debe aplicarse con sumo cuidado para evitar fuerzas adicionales.

- Repetibilidad.

La repetibilidad es la capacidad del instrumento de ofrecer resultados concordantes entre sí, cuando se somete varias veces a la misma carga, aplicada prácticamente de la misma forma y bajo condiciones de medición razonablemente constantes.

- Justeza o exactitud.

La justeza es la capacidad del instrumento de ofrecer indicaciones que no se diferencien del valor convencionalmente verdadero de cualquier carga aplicada en más que el valor absoluto del error máximo permisible.

Los instrumentos de pesar son susceptibles de variar su respuesta cuando se le carga de *Min* a *Max* y luego se le descarga en el sentido inverso, apareciendo lo que se conoce como **histéresis**.

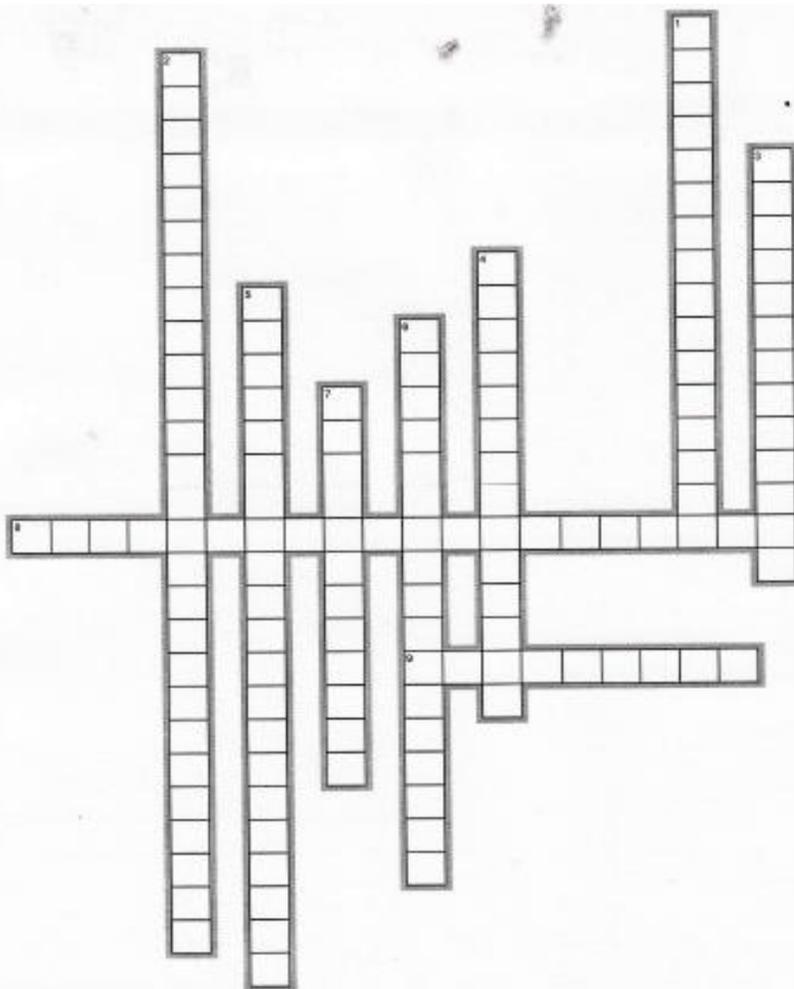
- Excentricidad

La excentricidad es la capacidad que tiene el instrumento de ofrecer indicaciones que no se diferencien del valor convencionalmente verdadero de una carga aplicada en diferentes segmentos del receptor de carga, en más que el valor absoluto del error máximo permisible.

Para comprobar el error de excentricidad hay que tener en cuenta el tipo de instrumento ya que su construcción se realiza en función de su uso. En general la comprobación se realiza aplicando sobre cada punto de apoyo una carga aproximadamente igual a  $1/3$  de la suma de *Max+Tara*.

## Ejercicio 4

Resuelva el siguiente crucigrama



EclipseCrossword.com

### Across

8. Dispositivo para ajustar la indicación a cero cuando hay carga en el receptor
9. Capacidad del instrumento de ofrecer indicaciones que no se diferencian del valor convencionalmente verdadero de cualquier carga aplicada en más que el valor absoluto del error máximo permisible

### Down

1. Máximo valor de carga distribuido a lo largo de la longitud de pesar que dicha unidad es capaz de pesar.
2. Categoría de instrumento de pesaje
3. Capacidad del instrumento de ofrecer resultados concordantes entre sí, cuando se somete varias veces a la misma carga, aplicada prácticamente de la misma forma y bajo condiciones de medición razonablemente constantes
4. Intervalo comprendido entre la capacidad mínima (Min) y la capacidad máxima (Max).
5. Tipo de indicación que puede tener un instrumento de pesar no automático
6. Parte del instrumento de pesar
7. Relación entre la variación de la indicación (?I) y la variación de la carga que la provoca (?m):

## 5. INSTRUMENTOS DE PESAR UTILIZADOS EN EL LABORATORIO. CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

En cualquier laboratorio donde se requieren las mediciones de masa, los operadores deben procurar esencialmente tener confianza en la exactitud y la trazabilidad de los instrumentos de pesar.

Se puede entender por exactitud de un instrumento de pesar, la capacidad que tiene de ofrecer resultados de una medición cuyos valores son muy próximos al valor convencionalmente verdadero de la masa de la carga. Es decir, la exactitud es una medida de cuan próximos o desviados están los resultados indicados por el instrumento con respecto a los valores “reales” de la masa del objeto que se mide.

La trazabilidad es la propiedad del resultado de la pesada de poder relacionarse con los patrones que representan la unidad de medida de masa al mayor nivel de exactitud, generalmente los patrones nacionales o el prototipo internacional, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones.

Ello generalmente se alcanza si se garantiza que:

- ◆ Los operadores posean un conocimiento teórico básico de la magnitud,
- ◆ Se utilice el instrumento apropiado atendiendo a las particularidades y la exactitud de la medición,
- ◆ El instrumento se encuentre correctamente instalado y en las condiciones apropiadas,
- ◆ El instrumento esté correctamente calibrado y se garantice su trazabilidad a través de un programa de calibraciones o verificaciones periódicas,
- ◆ Se use correctamente de acuerdo con las instrucciones de operación y los procedimientos para la medición, y
- ◆ Se tenga en cuenta la variabilidad inherente al proceso de pesada para evaluar la incertidumbre de los resultados de las pesadas.



Las avanzadas tecnologías en la electrónica y la cibernética han permitido disponer en la actualidad de una amplia diversidad de balanzas capaces de indicar valores de masa incluso por debajo del microgramo, que facilitan considerablemente la operación y poseen incluso dispositivos incorporados de auto comprobación y compensación de algunos efectos indeseados para su operación; pero por una parte, no todos los laboratorios disponen de alta tecnología de medición y por la otra, ello no garantiza el cumplimiento de los aspectos mencionados anteriormente, los cuales dependen de la capacidad y la habilidad del hombre.

### **Instrumentos de funcionamiento no automático**

Las balanzas de laboratorio se consideran instrumentos no automáticos ya que durante la pesada, se requiere de la intervención del operador ya sea para colocar o retirar la carga del receptor de carga, o para obtener el resultado de la pesada.

Los conceptos fundamentales relacionados con los instrumentos no automáticos; incluyendo los requisitos metrológicos y los métodos de prueba que se establecen a nivel internacional por la OIML pueden ser encontrados en la RI 76 “Instrumentos de pesar de funcionamiento no automático” publicada en 1992.

#### Tipos de instrumento

En los laboratorios se utilizan generalmente dos denominaciones de balanzas:

- ♦ Balanzas técnicas o de laboratorio
- ♦ Balanzas analíticas

Las balanzas analíticas son las que tienen un valor de división  $d < 1$  mg. Como la tecnología de fabricación de balanzas permite valores de división de hasta  $0,1 \mu\text{g}$ , las balanzas analíticas se identifican por las denominaciones siguientes:

<b>Tipo de balanza</b>	<b>Valor de división de la escala</b>
analíticas	$d=0,1$ mg
semimicroanalíticas	$d=0,01$ mg
microanalíticas	$d=0,001$ mg
ultramicroanalíticas	$d=0,1 \mu\text{g}$

Las balanzas de laboratorio tienen un valor de división  $\geq 1$  mg. Los requisitos metrológicos y procedimientos de prueba que se especifican en la OIML R 76 se pueden aplicar a las balanzas técnicas y no así a las analíticas.

La inmensa mayoría de las balanzas utilizadas actualmente no requieren del uso directo de las pesas durante la operación ya que son capaces de ofrecer directamente la indicación en unidades de masa a través de su escala graduada. Además, una gran parte de las balanzas que se usan actualmente son de indicación automática (balanzas electrónicas).

En algunos laboratorios se emplean aún instrumentos no graduados en unidades de masa, es decir que los instrumentos no entregan la indicación directamente en unidades de masa como es el caso de las balanzas mecánicas de brazos iguales.

### Partes y dispositivos principales

Las partes y dispositivos principales son el **receptor de carga**, donde se coloca el objeto a pesar, el **dispositivo de transmisión de la fuerza**, que transmite la señal de entrada, el **medidor de la fuerza**, que interpreta la fuerza que aplica la carga y la transmite ya sea en su forma inicial o transformada al **dispositivo indicador principal o auxiliar**, que entrega el resultado de la medición u otras informaciones posibles, el **dispositivo de nivelación**, para lograr que la fuerza se aplique en sentido normal, el **dispositivo de ajuste a cero**, que puede ser automático, semiautomático y no automático, el de selección de la tara, que puede ser aplicada en forma aditiva o sustractiva, entre otros.

### Características metrológicas

Las características metrológicas referidas para los instrumentos de pesar de funcionamiento no automático en el tema anterior, son también aplicables a los instrumentos de pesar de laboratorio, ya que estos se basan en este principio de funcionamiento. Añadiremos tan sólo algunas especificaciones.

Para los efectos de los controles metrológicos legales se introduce el concepto valor de división de verificación ( $e$ ), que es también una característica metrológica importante, cuya relación con el valor de división se puede determinar a partir de los criterios siguientes:

Tipo de instrumento	Valor de división de verificación
Graduado sin dispositivo auxiliar de indicación	$e=d$
Graduado con dispositivo auxiliar de indicación	$e$ se selecciona por el fabricante
No graduado	Ídem

Los dispositivos de indicación auxiliar se utilizan únicamente en los instrumentos de las clases I y II, donde están incluidas las balanzas de laboratorio. Estos pueden ser:

- Jinetillos
- Interpolador de lectura
- Indicador complementario
- Indicador con d diferenciado

El fabricante puede seleccionar el valor de e teniendo en cuenta que  $d < e \leq 10 \cdot d$  y siguiendo el criterio que se ilustra en la tabla siguiente:

d	0,1 g	0,2 g	0,5 g
e	1 g	1 g	1 g

El número de divisiones de verificación, se determina por la expresión:

$$n = \frac{Max}{e}$$

Por ejemplo, si se tiene un instrumento con Max=2 kg y e=10 mg se puede calcular fácilmente que el instrumento tiene un número de divisiones de verificación igual a 200 000.

### **Propiedades metrológicas**

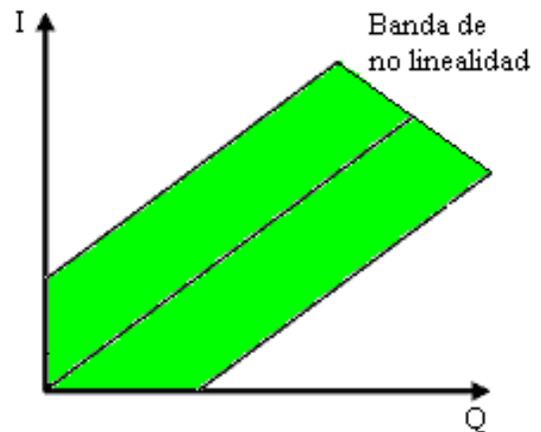
Las propiedades metrológicas más importantes de los instrumentos de pesar que se evalúan de acuerdo a la R 76, fueron analizadas en el tema anterior y son también aplicables a los instrumentos de pesar de laboratorio que satisfacen dicha recomendación. Estas propiedades son:

- Exactitud,
- Sensibilidad y/o discriminación,
- Repetibilidad
- Excentricidad

Para los efectos de la calibración de los instrumentos por otros métodos diferentes de los descritos en la R 76, se emplean los conceptos de linealidad y reproducibilidad en sustitución de la exactitud y la repetibilidad, los cuales veremos a continuación.

## Linealidad

La linealidad es la propiedad de la balanza de mantener en todo el rango de pesar una curva característica lineal. Como los instrumentos no están exentos de error se define una banda de no linealidad alrededor de la respuesta ideal de la balanza en una curva de indicación contra carga. Los fabricantes de las balanzas analíticas definen para cada modelo la banda de no linealidad, como se ilustra en la figura donde I es la indicación del instrumento y Q es la carga patrón colocada sobre receptor de carga.

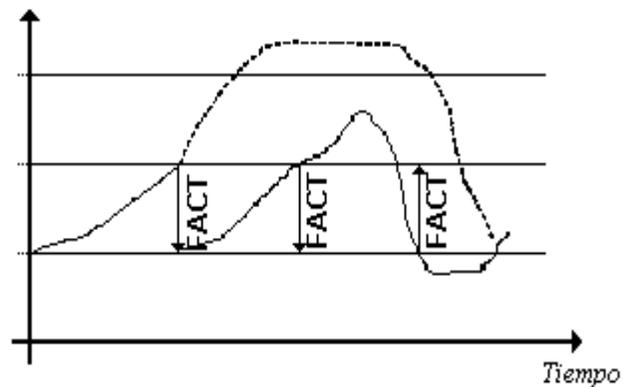


## Sensibilidad y discriminación

La sensibilidad (S) se define como la relación entre la variación en la indicación del instrumento ( $\Delta L$ ) y la variación de la carga que la genera ( $\Delta m$ ). En dependencia de la construcción de la balanza la sensibilidad puede ser constante o no para cualquier valor de carga.

Como hemos visto, la sensibilidad de un instrumento varía con la temperatura. En las balanzas electrónicas más modernas las derivas por sensibilidad son eliminadas automáticamente a través de un microprocesador (Tecnología FACT) de la forma en que se representa en la figura siguiente:

*Deriva de sensibilidad por temperatura*



## Reproducibilidad

Para evaluar la reproducibilidad de las balanzas se realizan 10 mediciones repetidas de una misma carga en las mismas condiciones. Como medida de la reproducibilidad se utiliza la desviación estándar.

## **Uso, cuidado y conservación de las balanzas de laboratorio**

Cuando se ha concebido un instrumento de pesar para una aplicación particular se debe prever de antemano la relación de exactitud que garantice la incertidumbre deseada en el resultado de la pesada. Disponer del instrumento teóricamente apropiado es una condición necesaria para asegurar pesadas confiables pero no es suficiente.

Se requiere también garantizar la calibración o verificación del instrumento con los patrones que aseguren que los resultados sean trazables. Está claro que no sólo la calidad de los patrones que se empleen garantiza la trazabilidad sino también el seguimiento de un adecuado procedimiento de calibración. Generalmente el procedimiento de calibración contempla la calidad de los patrones que deben ser empleados y las condiciones en que deben realizarse las pruebas.

Aun con el instrumento idóneo, idealmente calibrado, no se está en condición suficiente para asegurar resultados confiables. Se requiere además que la calibración del instrumento se mantenga por un período aceptable y que en el momento de la medición el instrumento funcione y se utilice correctamente. En esto se fundamenta la necesidad de contar con determinadas reglas para el uso, cuidado y conservación de los instrumentos.

### Instalación y emplazamiento

Un buen fabricante de instrumentos de pesar acompaña a su artículo con un manual de instrucciones para su instalación y operación. En ocasiones incluye la calibración entre otros aspectos.

Si se siguen las instrucciones del fabricante generalmente se tiene éxito. No obstante hay aspectos generales que se deben tener siempre presentes cuando se va a emplazar una balanza.

- Siempre que sea posible la habitación de la balanza debe tener un solo acceso, así no se utilizará como habitación de paso y se evitarán las corrientes de aire que afectan las mediciones.
- El puesto de trabajo más idóneo son los rincones de la habitación.
- Las mesas de trabajo sobre las cuales se colocan las balanzas deben ubicarse en lugares donde no haya vibración.
- No instalar la balanza cerca de las ventanas para evitar la incidencia directa de la radiación solar.

- No instalar la balanza cerca de los equipos de aire acondicionado o ventiladores, para evitar que en el lugar de medición se cree turbulencia del aire.
- Evitar los cambios bruscos de temperatura en la habitación. La temperatura nominal en la habitación debe ser la temperatura recomendada por el fabricante de la balanza.
- La humedad relativa de la habitación debe coincidir con la recomendada por el fabricante o las especificaciones del ensayo a realizar.
- Se recomienda el uso de lámparas de iluminación fluorescente ubicadas lo suficientemente distantes como para evitar radiación térmica perturbadora.
- Estos equipos deben estar protegidos de alteraciones de voltaje.
- La mesa que soporta la balanza no debe estar sometida a excesivas oscilaciones (debe ser rígida) y debe amortiguar las vibraciones existentes. El material que soporta la balanza debe ser antimagnético y ésta debe estar protegida ante cargas estáticas.

### Operación de la balanza

- Conecte la balanza al menos 30 minutos antes de hacer la pesada (así se eliminan posibles fallas producidas por falta de calentamiento de la balanza). En cada caso particular tenga en cuenta la recomendación del fabricante.
- No abrir la cámara de pesada innecesariamente. Al hacerlo evite los movimientos bruscos.
- Coloque la carga en el centro del platillo (evite errores por carga descentrada).
- Nunca toque con los dedos el recipiente de tara ni la carga, utilice pinzas, guantes u horquillas según convenga.
- Evite introducir la mano en el interior de la cámara de pesada, en caso contrario realice esa operación lentamente para evitar los cambios bruscos de la humedad y la temperatura de la misma.
- Antes de realizar cualquier pesada, observe que la balanza indica exactamente el cero.
- Hacer la pesada con cuidado pero tardando el menor tiempo posible en la pesada, mientras más tiempo sea el procesos de medición más probabilidades, existe que

puedan darse influencias externas (vibración, turbulencia de aire, etc.) que afecten el resultado.

- Haga la lectura en cuanto el resultado de la pesada sea estable.
- Mantenga limpia la balanza, su cámara de pesada y platillo; debe usarse tapacete para protegerla del polvo.

### Ejercicio 5

Resuelva el siguiente pareo

- |   |   |     |  |
|---|---|-----|--|
| 1 | $d=0,1 \mu\text{g}$   | ( ) | Instrumentos de funcionamiento no automático   |
| 2 | sensibilidad  | ( ) | Propiedad de la balanza de mantener en todo el rango de pesar una curva característica lineal.                                       |
| 3 | Reproducibilidad  | ( ) | Graduado con dispositivo auxiliar de indicación  |
| 4 | $e=d$   | ( ) | Relación entre la variación en la indicación del instrumento ( $\Delta L$ ) y la variación de la carga que la genera ( $\Delta m$ ). |
| 5 | Durante la pesada, se requiere de la intervención del operador ya sea para colocar o retirar la carga del receptor de carga, o para obtener el resultado de la pesada | ( ) | Ultramicroanalíticas   |
| 6 | Exactitud   | ( ) | Realizan 10 mediciones repetidas   |

## 6. CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE PESAR DE FUNCIONAMIENTO NO AUTOMÁTICO.

La calibración consiste en la comprobación o evaluación de las propiedades metrológicas que hemos visto anteriormente, lo cual se realiza teniendo en cuenta los siguientes principios básicos:

- Las pruebas se deben realizar en las condiciones normales de explotación,
- Se aplican tanto a los valores netos como a los valores de tara,
- Cuando la indicación del instrumento es digital y  $d > 0,2 \cdot e$ , se elimina el error antes del redondeo aplicando un método conveniente, y
- Cuando en calidad de cargas de prueba se requieran pesas patrones, la incertidumbre en la determinación de sus valores debe ser  $1/3 \text{ emp}$  aplicable al instrumento.

Un instrumento que se somete a control metrológico cuyas propiedades metrológicas no satisfagan las prescripciones legales se considera no conforme. Un instrumento que simplemente se somete a procedimientos de calibración cuyas propiedades metrológicas no satisfaga las necesidades del usuario se considera inapropiado. En cualquier caso el instrumento debe ser ajustado o reparado.

Como prescripciones legales para determinar la conformidad de los instrumentos que satisfacen la RI 76, se utilizan los valores máximos permisibles para los errores del instrumento que se especifican en el tema 3. Para los efectos de la calibración de los instrumentos por otros métodos diferentes de los descritos en la R 76, se emplean los conceptos de linealidad y reproducibilidad en sustitución de la exactitud y la repetibilidad.



## **Procedimiento de calibración de los instrumentos que cumplen con la RI 76.**

La descripción del procedimiento de calibración de un instrumento en uso se presenta a través de un ejemplo particular. Tomemos una báscula electrónica.

### Condiciones de calibración

La calibración se realiza bajo las mismas condiciones de operación del instrumento.

### Comprobación del funcionamiento

Se comprueba el correcto funcionamiento de los dispositivos receptor de carga, medidor de carga, indicador y de ajuste de cero.

Para los instrumentos que requieran de una calibración previa con pesas incorporadas o pesas externas, ésta deberá ejecutarse de forma externa con una carga patrón y siguiendo las instrucciones del fabricante.

### Comprobación de las características metrológicas

Se comprueba la correspondencia entre las características metrológicas informadas por el cliente en el momento de la solicitud del servicio y las características reales del instrumento que se indican a continuación:

*Max*: capacidad máxima,

*d*: valor de división real,

*e*: valor de división de verificación,

*n*: número de divisiones de verificación,

*Min*: capacidad mínima.

Los valores se registran en el reporte de calibración.

### Comprobación de las propiedades metrológicas

Las propiedades metrológicas se comprueban generalmente en el orden siguiente:

- repetibilidad,
  - excentricidad y
  - error de indicación y discriminación (sensibilidad).
- **Comprobación de la repetibilidad:** Para comprobar la repetibilidad deben realizarse dos series de mediciones, una para con una carga de aproximadamente 50 % y otra con una

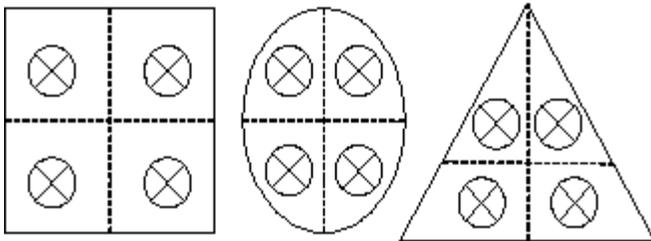
carga cercana a 100 % de la capacidad máxima. Para los instrumentos con *Max* inferior a 1 000 kg cada serie constará de 10 pesadas. En otros casos, cada serie debe constar de 3 pesadas como mínimo.

Compruebe que el instrumento sin carga indique cero. En caso contrario ajuste a cero. Coloque la carga de prueba lo más centradamente posible sobre el receptor de carga. Las lecturas deben tomarse cuando el instrumento está cargado y cuando el instrumento descargado ha llegado a su posición de descanso entre pesadas. En el caso de una desviación de cero entre pesadas, el instrumento debe ser reajustado a cero.

Para evaluar si el instrumento satisface la exigencia metrológica determine la diferencia entre la mayor y la menor indicación, la cual no debe exceder el valor del error máximo permisible para la carga dada.

- **Comprobación de la excentricidad:** Se utiliza una carga de prueba de valor nominal aproximadamente igual  $1/3$  de la suma de la capacidad máxima y el efecto máximo de tara aditiva correspondiente. Deben usarse preferentemente masas grandes en lugar de varias masas pequeñas. Las masas más pequeñas deben colocarse en la parte superior de las de mayor tamaño. Por ejemplo en una balanza de 200 g, la excentricidad se comprueba con una carga patrón de 70 g y conformada por las pesas de 50 y 20 g del juego de pesas patrones.

Para instrumentos con receptor de carga que no tenga más de 5 puntos de apoyo, se divide la superficie del receptor de carga en cinco segmentos de superficie aproximadamente iguales, colocándose sucesivamente la carga en el centro de cada uno de los cuatro segmentos de superficie y determinando la indicación del instrumento en cada caso. Los segmentos de superficie pueden ser los que se representan en la figura siguiente:



Para instrumentos con receptor de carga de más de cuatro puntos de apoyo, la carga se aplicará sobre cada punto de apoyo en un área del mismo orden de magnitud que la fracción  $1/n$  del área superficial del receptor de carga, siendo  $n$  el número de puntos de apoyo.

Para instrumentos con receptor de carga especial (tanque, tolva, etc.), se aplica la carga de prueba sobre cada punto de apoyo.

La diferencia entre la mayor y la menor indicación del instrumento para las diferentes posiciones de la carga no debe superar el valor del error máximo permisible para la carga dada.

- **Comprobación de los errores de indicación:** Las pruebas se realizan como mínimo en 5 valores de carga a lo largo del rango de pesar, incluyendo *Min*, *Max* y valores cercanos a los puntos de cambio del error máximo permisible. Se determinará el error de indicación tanto para valores crecientes de la carga aplicada desde cero hasta *Max*, como para valores decrecientes desde *Max* hasta cero.

Los valores del error del instrumento no deben superar el valor del error máximo permisible para la carga dada.

- **Comprobación de la discriminación (sensibilidad):** La comprobación se realiza en 3 de los puntos en los cuales se comprueba el error de indicación: *Min*, un valor cercano a  $1/2$  *Max* y un valor cercano a *Max*, siempre que sea posible. En calidad de cargas de prueba se utilizan pesas patrones.

Durante la comprobación de los errores de indicación en cada una de las 3 cargas indicadas anteriormente, la discriminación (sensibilidad) se comprueba adicionando sobre el receptor de carga, una carga patrón cuyo valor corresponde al valor que se indica en la tabla siguiente que tiene en cuenta el tipo de instrumento que se calibra.

<b>Exigencias metrológicas para la discriminación</b>		
<b>Tipo de instrumento</b>	<b>Carga adicional</b>	<b>Respuest</b>
con equilibrio no automático	0,4·e.m.p.	se mueve el indicador.
con equilibrio auto o semiautomático e indicación analógica	e.m.p.	se indica al menos 0,7 veces la carga adicional
con equilibrio auto o semiautomático e indicación digital	1,4·d	salta la indicación de I a I+d

Para los diferentes tipos de instrumento las exigencias para la discriminación (sensibilidad) se satisfacen siempre que su respuesta ante la adición de la carga antes señalada se corresponde con las indicaciones de la tabla.

### **Calibración de balanzas por un procedimiento diferente al indicado en la OIML R 76**

Los métodos de prueba de los instrumentos no automáticos especificados en la OIML R76 no son aplicables a las balanzas analíticas ya que el valor de una división es menor que 0,1 mg. En este caso no se tiene en cuenta el error máximo permisible y la linealidad se evalúa teniendo en cuenta las especificaciones del fabricante. El procedimiento que se

describe a continuación se puede aplicar.

### Cargas de prueba

Las cargas de prueba deben tener un valor de masa determinado con una incertidumbre al menos 3 veces menores que la exactitud del instrumento que se calibra. Se manipulan sólo empleando pinzas u horquillas de un material apropiado evitando cualquier daño físico a las pesas que la conforman que pueda producirse por roce, fricción o golpes su manipulación. Las pesas que conforman la carga de prueba, cuando no se encuentren sobre el receptor de carga se deben mantener en su estuche.

### Materiales y reactivos

- Alcohol
- Paño
- Brocha o pincel

### Operaciones preliminares

- **Acondicionamiento de las cargas de prueba:** Antes de iniciar las operaciones de la calibración las pesas se colocan en un lugar seguro, lo más cercano posible al instrumento que se calibra, y se abre la tapa del estuche exponiendo las pesas a las mismas condiciones ambientales que la cámara de pesar del instrumento durante no menos de 10 min.
- **Limpieza y acondicionamiento de la balanza:** El receptor de carga de la balanza se limpia con alcohol étílico utilizando un paño apropiado. Con una brocha de pelo suave o un pincel, se elimina cualquier presencia de polvo en el interior de la cámara de pesar. Terminada la limpieza la cámara de pesar del instrumento se expone a las condiciones ambientales del local al igual que las pesas al menos durante 10 min.
- **Instalación y funcionamiento de la balanza:** La instalación del instrumento se realiza siguiendo las instrucciones del fabricante. Se debe prestar especial atención al tiempo de calentamiento, la nivelación y la calibración interna o externa según proceda.

Una vez comprobada la instalación, se opera normalmente el instrumento durante no menos de 5 min. Empleando un objeto de pesar diferente de las cargas de prueba. Hay que observar que las indicaciones del instrumento con y sin carga sean estables.

## Procedimiento de calibración

### Estimación de la repetibilidad o la reproducibilidad

- a) Inicialmente se selecciona una carga de prueba que tenga un valor de masa cercano a  $\frac{1}{2}$  Max del instrumento que se calibra.
- b) El instrumento sin carga debe indicar cero de manera estable antes de la prueba.
- c) Se coloca la carga de prueba de manera concentrada sobre el centro del receptor de carga y se anota en el registro de calibración el valor indicado por el instrumento.
- d) Se retira la carga del y se comprueba que el instrumento sin carga indica cero de manera estable.
- e) Se repiten las operaciones c) y d) sucesivamente hasta obtener 10 indicaciones del instrumento.
- f) Seguidamente se selecciona una carga de prueba que tenga un valor de masa cercano a *Max* del instrumento y se repiten las operaciones de la b) a la e).
- g) Terminadas las operaciones se calcula la desviación estándar de la media de las indicaciones correspondientes a cada carga de prueba y se anotan los valores obtenidos en el registro de calibración.

### Evaluación de la excentricidad

Se divide imaginariamente el receptor de carga en 5 zonas de similar superficie y se representa esquemáticamente en el registro de calibración identificando el centro y cada zona con un número del 1 al 5.

- a) Se selecciona una carga de prueba que tenga un valor de masa cercano al 30 % *Max* del instrumento que se calibra.
- b) El instrumento sin carga indica cero de manera estable.
- c) Se coloca la carga de prueba de manera concentrada sobre el centro del receptor de carga (posición 1 del ejemplo) y se anota en el registro de calibración el valor convencionalmente verdadero de la masa de la carga de prueba y el valor de la indicación del instrumento.
- d) Se calcula la diferencia entre ambos valores y se anota el resultado en el registro de calibración.
- e) Luego se retira la carga y se comprueba que el instrumento indica cero de manera estable.
- f) Se repiten las operaciones de la c) a la e) colocando sucesivamente la carga de prueba de manera concentrada sobre el centro de las zonas de la 2 a la 5.

## Evaluación de la linealidad

- El instrumento sin carga indica cero de manera estable.
- Se selecciona una carga de prueba que tenga un valor de masa cercano al 10 % *Max* del instrumento que se calibra.
- Se coloca la carga de prueba de manera concentrada sobre el centro del receptor de carga y se anota en el registro de calibración el valor convencionalmente verdadero de la masa de la carga de prueba y el valor de la indicación del instrumento.
- Se calcula la diferencia entre ambos valores y se anota el resultado en el registro de calibración.
- Se retira la carga y se comprueba que el instrumento indica cero de manera estable. f)

Las operaciones de la b) a la e) se repiten incrementando progresivamente la carga de prueba en un 10 % de *Max* del instrumento que se calibra, hasta llegar al 100 % de *Max* y completar 10 pruebas.

## Ejercicio 6

Parte a. Complete la información faltante

<b>Instrumento</b>	Balanza Analítica de Funcionamiento No Automático con indicación digital			
<b>Fabricante</b>	AND			
<b>Modelo</b>	GR-200			
<b>Serie</b>	14218237			
<b>Código</b>	LQO-005			
<b>Rango de medición</b>	0 g a 210 g			
<b>Resolución</b>	0,001 g			
<b>Temperatura inicial (°C)</b>	23,7 °C			
<b>Temperatura final (°C)</b>	24,7 °C			
<b>Humedad relativa inicial</b>	84 %			
<b>Humedad relativa final</b>	79 %			
<b>Repetibilidad</b>	Carga aplicada =		<b>Media</b>	<b>Máxima</b>
			105	210
<b>Excentricidad</b>	Carga aplicada =	70		

Puntos comprobados	Valor de la masa de las pesas	U <sub>cal</sub>	Indicación del instrumento
			Ascenso
0,01	0,10000670	0,000005300	0,0103
10	9,9999840	0,000020000	9,9999
50	50,0000390	0,000033000	49,9993
150	149,9999380	0,000086000	149,9986
210	209,9999240	0,000120000	209,9974

Prueba de Repetibilidad			
Carga media:	105	Carga máxima:	210
n =	10	n =	10
n	Indicación del instrumento (I)	n	Indicación del instrumento (I)
1	104,9984	1	209,9968
2	104,9984	2	209,9970
3	104,9984	3	209,9968
4	104,9988	4	209,9967
5	104,9984	5	209,9972
6	104,9986	6	209,9971
7	104,9985	7	209,9968
8	104,9992	8	209,9970
9	104,9984	9	209,9970
10	104,9985	10	209,9969
S			

**Máxima desviación de las repetibilidades**

<b>Prueba de Excentricidad</b>		
<b>Carga aplicada:</b>		<b>70</b>
<b>Sección</b>	<b>Indicación (I)</b>	<b>Difer. entre indicaciones</b>
<b>1 (Centro)</b>	<b>69,9992</b>	
2	69,9996	
3	69,9988	
4	69,9989	
5	69,9994	
Máxima Diferencia con respecto al centro ( $D_1$ ) =		

<b>Puntos comprobados</b>	<b>Valor de la masa convencional de los patrones</b>	<b>Indicaciones del instrumento calibrado</b>	<b>Error de indicación</b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>

Parte b. Complete la información faltante

<b>Instrumento</b>	Balanza Analítica de Funcionamiento No Automático con indicación digital
<b>Fabricante</b>	<b>AND</b>
<b>Modelo</b>	<b>GR-200</b>
<b>Serie</b>	<b>14229921</b>
<b>Código</b>	<b>---</b>
<b>Rango de medición</b>	<b>0 g a 210 g</b>
<b>Resolución</b>	<b>0,001 g</b>
<b>Temperatura inicial (°C)</b>	<b>24,8 °C</b>
<b>Temperatura final (°C)</b>	<b>24,9 °C</b>

<b>Humedad relativa inicial</b>	<b>79 %</b>			
<b>Humedad relativa final</b>	<b>78 %</b>			
<b>Repetibilidad</b>	Carga aplicada =		<b>Media</b>	<b>Máxima</b>
			105	210
<b>Excentricidad</b>	Carga aplicada =	70		

<b>Comprobación del error de indicación sin tara</b>			
<b>Puntos comprobados</b>	<b>Valor de la masa de las pesas</b>	<b>U<sub>cal</sub></b>	<b>Indicación del instrumento</b>
			<b>Ascenso</b>
0,01	0,01000160	0,000002700	0,0100
10	9,9999840	0,000020000	10,0000
50	50,0000390	0,000033000	50,0007
150	149,9999380	0,000086000	150,0003
210	209,9999240	0,000120000	209,9985

<b>Prueba de Repetibilidad</b>			
<b>Carga media:</b>	105	<b>Carga máxima:</b>	210
<b>n =</b>	<b>10</b>	<b>n =</b>	<b>10</b>
<b>n</b>	<b>Indicación del instrumento (I)</b>	<b>n</b>	<b>Indicación del instrumento (I)</b>
1	105,0008	1	209,9987
2	105,0008	2	209,9988
3	105,0008	3	209,9987
4	105,0007	4	209,9988
5	105,0008	5	209,9989
6	105,0009	6	209,9988
7	105,0008	7	209,9990
8	105,0008	8	209,9989
9	105,0009	9	209,9988

10	105,0009	10	209,9992
S		S	

<b>Máxima desviación de las repetibilidades</b>	
---	--

<b>Prueba de Excentricidad</b>		
<b>Carga aplicada:</b>		<b>70</b>
<b>Sección</b>	<b>Indicación (I)</b>	<b>Difer. entre indicaciones</b>
<b>1 (Centro)</b>	<b>70,0011</b>	
2	70,0009	
3	70,0008	
4	70,0013	
5	70,0012	
Máxima Diferencia con respecto al centro ( $D_1$ ) =		

<b>Puntos comprobados</b>	<b>Valor de la masa convencional de los patrones</b>	<b>Indicaciones del instrumento calibrado</b>	<b>Error de indicación</b>	<b>Incertidumbre Expandida <math>k = 2</math></b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>

## 7. EVALUACIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES DURANTE LA CALIBRACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE PESAR.

### Aspectos fundamentales del cálculo y expresión de la incertidumbre de la medición

#### Definición de Incertidumbre de la medición

De acuerdo a una definición elemental, medir es comparar la unidad con la cantidad. Considerándolo en un sentido más amplio, definiremos medir como un proceso que está constituido por la adquisición de datos, su tratamiento y la expresión del resultado final.

Cuando se reporte el resultado de una medición, es obligatorio proporcionar alguna indicación cuantitativa de la calidad del mismo, es decir, de cuán bien éste representa el valor de la cantidad objeto de medición o mensurando. Para tal fin se utiliza la incertidumbre de la medición.

La incertidumbre es un parámetro que caracteriza el hecho de que cualquier resultado de medición no es un valor único, sino que está constituido por un intervalo alrededor del mejor valor obtenido y cuya amplitud es precisamente la incertidumbre de la medición.

$$Y = X \pm U$$

Mientras más pequeña sea la incertidumbre de la medición, más exacta es la misma. De aquí, que este parámetro caracteriza la calidad de la medición, permite valorar la confiabilidad en su resultado y comparar entre sí distintas mediciones.



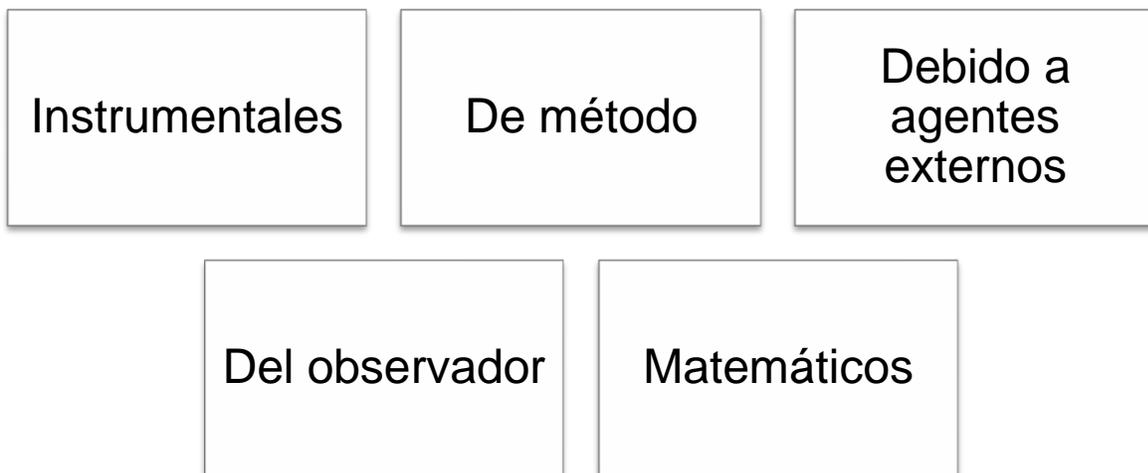
Según el Vocabulario Internacional de Términos Básicos y Generales de Metrología:

**Incertidumbre de medición:** Parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que pudieran ser razonablemente atribuidos a la magnitud a medir.

#### Relación entre error e incertidumbre

En general todo procedimiento de medición tiene imperfecciones que dan lugar a un error en el resultado de la medición, lo que provoca que éste sea sólo una aproximación o estimado del valor del mensurando.

Las causas de los errores de medición pueden ser:



La primera fuente de error es la propia limitación de los instrumentos de medición que utilizamos. Si un instrumento de medición tiene su calibración vigente y ha sido usado correctamente, se puede afirmar que sus errores están dentro de los límites del error máximo permisible especificados en la documentación correspondiente. En mediciones de alta exactitud los errores instrumentales pueden disminuirse en gran medida introduciendo las correcciones reportadas en su certificado de calibración.

Los valores exactos de las contribuciones al error de la medición provenientes de los diferentes efectos aleatorios y sistemáticos que intervienen en la misma son desconocidos e incognoscibles, por el carácter aproximado de nuestro conocimiento o por su propia naturaleza. Por tanto, el error de una medición es un concepto idealizado, cuyo valor exacto no podemos conocer, sin embargo, la incertidumbre con ellos asociada puede ser evaluada.

Los valores exactos de las contribuciones al error del resultado de una medición son desconocidos y no se pueden conocer, pero las incertidumbres asociadas con los efectos aleatorios y sistemáticos que dan lugar al error pueden ser evaluadas.

Podemos decir que la incertidumbre de medición representa un intervalo de valores alrededor de cero, en el cual con un alto grado de confianza debe encontrarse el valor del error de la medición.

El resultado de una medición (después de las correcciones requeridas) puede estar muy cercano al valor del mensurando de una forma que no puede conocerse (y entonces tener un error muy pequeño), y aún así tener una gran incertidumbre. Entonces la incertidumbre del resultado de una medición no debe ser confundida con el error desconocido remanente.

En la práctica, existen muchas fuentes posibles de incertidumbre de una medición, entre ellas podemos mencionar:

- a) Realización imperfecta de la definición del mensurando.
- b) Conocimiento aproximado de los efectos de las condiciones ambientales sobre las mediciones, o mediciones imperfectas de dichas condiciones ambientales.
- c) Resolución finita del instrumento o umbral de discriminación finito.
- d) Valores inexactos de instrumentos de medición y materiales de referencia utilizados. e)

Valores inexactos de constantes y otros parámetros obtenidos de fuentes externas y usados en los algoritmos de reducción de datos

- f) Aproximaciones y suposiciones incorporadas en los métodos y procedimientos de medición
- g) Variaciones en observaciones repetidas del mensurando bajo condiciones aparentemente iguales

Estas fuentes no son necesariamente independientes, y algunas de las fuentes desde la a) hasta f) pueden contribuir a la fuente g).

### Componentes de incertidumbre estándar

Puesto que el conocimiento aproximado del mensurando es la base de la incertidumbre en la medición, debemos partir de este carácter aproximado para expresar la misma.

La mejor forma de describir el conocimiento incompleto del mensurando es a partir de la caracterización de la variable aleatoria que representa el resultado de la medición del mensurando dado.

El mejor estimado del resultado de la medición es su esperanza matemática, mientras que los valores de la varianza o de la desviación estándar de la variable aleatoria dada describen de manera consistente la dispersión de los valores que la misma puede tomar.

Entonces, la desviación estándar  $\sigma(\bar{X}) = +\sqrt{V(\bar{X})}$ , es tomada como medida fundamental de la incertidumbre de la medición y se denomina incertidumbre estándar de medición:

$$\text{Incertidumbre estándar de medición} = \sqrt{\text{Varianza}}$$

La incertidumbre estándar de medición no es una cantidad inherente a un mensurando, sino que caracteriza al resultado de la medición realizada de un mensurando.

La incertidumbre de medición asociada con el resultado de una medición es evaluada a partir de varias componentes, debidas a los efectos aleatorios y sistemáticos que ocurren en el proceso de medición, cada una de las cuales puede evaluarse por dos métodos diferentes:

- Evaluación tipo A de la incertidumbre estándar.
- Evaluación tipo B de la incertidumbre estándar.

#### Evaluación de tipo A de las componentes de incertidumbre estándar

La evaluación de tipo A de la incertidumbre estándar es el método de evaluación basado en el análisis estadístico de una serie de observaciones. La misma puede ser aplicada cuando se han realizado varias observaciones independientes de la magnitud X bajo las mismas condiciones. Sólo cuando existe suficiente resolución en el proceso de medición, la dispersión de las observaciones podrá observarse, puesto que se obtendrá un grupo de valores al repetir la medición en condiciones prácticamente iguales, algunos de los cuales pueden o no repetirse.

Las observaciones individuales difieren en valor debido a las variaciones aleatorias en las magnitudes que las afectan, es decir, debido a los efectos aleatorios.

La desviación estándar experimental de la media  $S(\bar{X})$  cuantifica qué tan bien estima la esperanza matemática de la variable aleatoria de la magnitud dada, y por lo tanto se toma como medida de la incertidumbre estándar obtenida por el método A, que se llama incertidumbre estándar de tipo A:

$$u(x) = S(\bar{X}) = +\sqrt{S^2(\bar{X})} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}$$

Mientras mayor es n, más confiable es el estimado que  $\bar{X}$  y  $S(\bar{X})$  dan de la esperanza

Matemática y su desviación estándar respectivamente. Sin embargo, en la práctica de las mediciones nos encontramos con frecuencia con casos en que el número de las mediciones realizadas es bastante pequeño ( $n < 6$ ). En tal caso, o bien se tiene una valoración de  $S_p(X)$  a partir de estudios realizados anteriormente para un número mayor de repeticiones de la medición y entonces, la componente de incertidumbre estándar de tipo A de la medición actual donde sólo se han realizado  $n$  mediciones se calcula como:

$$u(x) = \frac{S_p(x)}{\sqrt{n}}$$

### 6.1.5 Evaluación de tipo B de las componentes de incertidumbre estándar

Una evaluación de tipo B de la incertidumbre estándar se realiza cuando no se dispone de información sobre la magnitud dada para hacer un análisis estadístico.

En tal caso, la incertidumbre se evalúa a partir de un juicio científico utilizando toda la información de que se disponga sobre la posible variabilidad de la magnitud dada.

El conjunto de esta información puede incluir:

- Datos de mediciones anteriores.
- Experiencia o conocimiento general del comportamiento y propiedades de materiales e instrumentos relevantes.
- Especificaciones de los fabricantes.
- Datos proporcionados en los certificados de calibración y otros reportes.
- Incertidumbres asignadas a datos de referencia tomados de manuales.

El problema consiste en determinar las desviaciones estándar asociadas con estas magnitudes mediante juicios o distribuciones de probabilidad a priori. La  $u(x)$  evaluadas de este modo, es llamada incertidumbre estándar de tipo B.

El uso adecuado de la información de que se dispone para una evaluación tipo B de la incertidumbre estándar requiere de una visión basada en la experiencia y el conocimiento que se tenga acerca de los factores que interactúan en el proceso de medición, fundamentalmente del principio, del método y los instrumentos de medición. Una evaluación de incertidumbre estándar tipo B puede ser tan confiable como una de tipo A, especialmente en una situación donde una evaluación de tipo A se base en un número relativamente pequeño de observaciones estadísticamente independientes.

Al evaluar la incertidumbre de tipo B podemos encontrarnos con diversas situaciones, entre las más frecuentes podemos mencionar:

1. La estimación de la magnitud  $X_i$  se toma de un certificado de calibración, especificación del fabricante, manual u otra fuente y en el documento en cuestión la incertidumbre asignada al valor de  $X_i$  se establece como un múltiplo particular de una desviación estándar, entonces la incertidumbre estándar  $u(x_i)$  es sencillamente el valor asignado dividido por el factor de multiplicación:

$$u(x_i) = \frac{U(x)}{k}$$

La incertidumbre del valor reportado se establece a partir de un intervalo en el cual se encontrarán los valores de la variable dada con una probabilidad de 90 %; 95 % ó 99 %.

En tal caso la incertidumbre estándar se calcula a partir de dividir el valor de la incertidumbre reportada por el factor apropiado, el cual, a menos que se indique otra cosa, se determina a partir de la distribución normal y tiene valores 1,64; 1,96 y 2,58 para las probabilidades mencionadas, respectivamente.

2. Si sólo es posible estimar los límites superior e inferior entre los cuales existe igual probabilidad de que se encuentren los valores de la variable aleatoria, o sea,  $\bar{X}_i \pm a$  (considerando límites simétricos) y fuera de estos límites la probabilidad es cero, entonces se aplicará una distribución rectangular para estimar la desviación estándar asociada:

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Es importante no “contar dos veces” la misma componente de incertidumbre. Es decir, si una componente de incertidumbre que resulta de un efecto en particular, se obtiene a partir de una evaluación de tipo B, debería incluirse como una componente independiente más de incertidumbre únicamente si el efecto que ella produce no contribuye a la variabilidad de las observaciones. Esto es así, porque esta componente de incertidumbre está ya incluida en la componente de incertidumbre de tipo A, obtenida a partir del análisis estadístico de las observaciones.

### 6.1.6 Incertidumbre del resultado de la medición

La incertidumbre estándar combinada representa la incertidumbre total de la medición y se determina combinando adecuadamente las componentes de tipo A y de tipo B de la incertidumbre según la ley de suma de varianzas como veremos a continuación:

Sea la magnitud  $Y$  la función de las variables aleatorias  $X_1, X_2, \dots, X_N$  independientes:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

La incertidumbre típica de  $y$ , donde  $y$  es la estimación del mensurando  $Y$  y por lo tanto, el resultado de la medición, se obtiene combinando apropiadamente las incertidumbres típicas de las estimaciones de los argumentos  $X_1, X_2, \dots, X_N$ .

Esta incertidumbre estándar combinada de la estimación de  $Y$  se denota por  $u_c(y)$  y cuando los argumentos  $X_i$  son independientes, es igual a la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada  $u_c^2(y)$ , la cual está dada por:

$$u_c(y) = +\sqrt{u_c^2(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}$$

Cada  $u(x_i)$  es una incertidumbre estándar evaluada como componente de tipo A o de tipo B. La incertidumbre estándar combinada  $u_c(y)$  es una desviación estándar estimada que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser razonablemente atribuidos al mensurando  $Y$ .

La expresión anterior se denomina frecuentemente ley de propagación de incertidumbres.

Si el modelo matemático en que fundamenta la medición es igual a la suma lineal de variables:

$$Y = X_1 + X_2 + X_3 + \dots$$

entonces todas las derivadas son igual a 1 y la fórmula para calcular la incertidumbre combinada queda de la siguientes forma:

$$u_c(y) = \sqrt{u^2(x_1) + u^2(x_2) + u^2(x_3) + \dots}$$

Aunque la incertidumbre combinada, puede ser utilizada para expresar la incertidumbre del resultado de la medición, en aplicaciones industriales, comerciales, o relacionadas con la salud y la seguridad del hombre, se prefiere dar una medida de la incertidumbre que represente un intervalo respecto al resultado de la medición ( $X$ ) en el cual es razonable que se encuentre el valor de mensurando con gran probabilidad. Para ello se calcula la llamada incertidumbre expandida:

$$U = k \cdot u_c(y)$$

El valor de  $k$ , denominado factor de cobertura, se toma por lo general entre 2 y 3. Por lo general se toma igual a 2 y sólo en el caso de mayor riesgo relacionado con el resultado de la medición se toma igual a 3.

Esta expresión la interpretaremos en el sentido de que, producto de la medición, no hemos obtenido un valor ( $y$ ) sino un conjunto de valores dados por el intervalo ( $y-U$ ;  $y+U$ ) en el cual debe encontrarse el valor de la cantidad medida con una alta probabilidad. En el valor de  $U$  no deben reportarse más de dos cifras significativas y el valor de  $y$  se redondeará hasta el orden decimal de la última cifra reportada de la incertidumbre.

### **Cálculo de la incertidumbre en la calibración de instrumentos de pesar**

- o Conocimiento inexacto de la masa de las pesas

$$u(I) = \frac{U_{cal}}{2}$$

- o Valor de división / Resolución del instrumento

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

- o Repetibilidad del instrumento calibrado

$$u(DIR) = s_i / \sqrt{n}$$

- o Excentricidad del instrumento calibrado

$$u(DI_g) = \frac{(Dif_{maxima} (I_{centro} - I_{posicion}))}{\sqrt{12}}$$

- o Incertidumbre combinada

$$u_c(E) = \sqrt{u^2(I) + u^2(Q) + u^2(DIR) + u^2(DI_g)}$$

- o Incertidumbre expandida

$$U(E) = k \cdot u(E)$$

## Cálculo de la incertidumbre en la calibración de pesas

magnitud de entrada $X_i$	Valor estimado	Incertidumbre típica $u(x_i)$	distribución de probabilidad	coeficiente de sensibilidad $c_i$	contribución a la incertidumbre $u(y)$
$m_p$	$m_n + e_p$	$\frac{U(m_p)}{k}$	normal	1	$\frac{U(m_p)}{k}$
$\delta m_p$	0	$\frac{\delta m_p}{\sqrt{3}} \circ \frac{U(m_p)}{\sqrt{3}}$	rectangular	1	$\frac{\delta m_p}{\sqrt{3}} \circ \frac{U(m_p)}{\sqrt{3}}$
$\rho$	$\rho$	$u(\rho_s)$	normal	$(V_m - V_p)$	$(V_m - V_p) \cdot u(\rho_s)$
$V_p$	$V_p$ (certificado)	$\frac{U(V_p)}{k}$	normal	$(\rho_s - \rho'_s)$	$(\rho_s - \rho'_s) \cdot \frac{U(V_p)}{k}$
$V_m$	$V_m$ (certificado)	$\frac{U(V_m)}{k}$	normal	$\rho_s$	$\rho_s \cdot \frac{U(V_m)}{k}$
	$V_f$ (fabricante)	$\frac{U(V_m)_f}{\sqrt{3}}$	rectangular		$\rho_s \cdot \frac{U(V_m)_f}{\sqrt{3}}$
	$V_m = \frac{m_n}{\rho_m}$ (tabulado)	$\frac{u(V_m)}{V_m} = \frac{u(\rho_m)}{\rho_m}$	rectangular		$\rho_s \cdot V_m \cdot \frac{u(\rho_m)}{\rho_m}$
$\bar{I}_{m-p}$	$\frac{\sum_{i=1}^n I_{(m-p)}}{n}$	$\frac{s(I_{m-p})}{\sqrt{n}} \circ \frac{s_p}{\sqrt{n}}$	normal	1	$\frac{s(I_{m-p})}{\sqrt{n}} \circ \frac{s_p}{\sqrt{n}}$
		$\frac{d}{\sqrt{6}}$	rectangular	1	$\frac{d}{\sqrt{6}}$
$\delta e$	0	$\frac{\delta e}{\sqrt{12}}$	rectangular	1	$\frac{\delta e}{\sqrt{12}}$
Incertidumbre combinada					$u(m_n) = \sqrt{\sum u_i^2(y)}$
Incertidumbre expandida					$U(m_n) = k \cdot u(m_n)$

### Ejercicio 7

Realice el cálculo de incertidumbre con todas las componentes desarrolladas para los ejercicios 3 a, 3 b, 6 a y 6b y complete la siguiente información

Parte a

Valor Nominal	Error convencional de la pesa $e_{cm}$	Incertidumbre Expandida con $k=2$
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>

Parte b

<b>Valor Nominal</b>	<b>Error convencional de la pesa <math>e_{cm}</math></b>	<b>Incertidumbre Expandida con <math>k = 2</math></b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>

Parte c

<b>Puntos comprobados</b>	<b>Error de indicación</b>	<b>Incertidumbre Expandida <math>k = 2</math></b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>

Parte d

<b>Puntos comprobados</b>	<b>Error de indicación</b>	<b>Incertidumbre Expandida <math>k = 2</math></b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>

## 8. BIBLIOGRAFÍA

BIPM. (2008). *Evaluation of measurement data- Guide to the expression of uncertainty in measurement*. París.

Centro Español de Metrología. (2000). *PROCEDIMIENTO ME- 012 PARA LA CALIBRACIÓN DE MASAS PATRÓN (MASA REAL)* (00 ed.). España.

Miller, M. (2006). *Ejercicios de conversiones*. Recuperado el 26 de 08 de 2013, de <http://www.mamutmatematicas.com/ejercicios/tabla-medicion.php?col=2&row=10&level=1&ouncespounds=1&poundstons=1&font=Default&FontSize=12pt&pad=6&extraspaces=1&ptitle=&Submit=Submit>

PROCAME. (2013). *Procedimientos de calibración balanzas de funcionamiento no automático y pesas*. Heredia.

Sistema Interamericano de Metrología. (2009). *Guía para la calibración de instrumentos para pesar de funcionamiento no automático*.



## 9. RESPUESTAS DE LOS EJERCICIOS

### Ejercicio 1

- |               |             |             |             |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| 1. 9,3 dag    | 5b. 11,4 dg | 9. 4 lb     | 13 4 000 lb |
| 2. 640 000 mg | 6. 11 dg    | 10 8 000 lb | 14 32 oz    |
| 3. 260 cg     | 7. 5,6 g    | 11. 48 oz   | 15 8 lb     |
| 4. 2 800 cg   | 8 1 500 mg  | 12 160 oz   | 16. 5 lb    |

### Ejercicio 2

Número	Clase	Número	Pesa
1	M2	6	F1
2	F1	7	F1
3	F1	8	E2
4	E1	9	M2
5	F1		



## Ejercicio 3

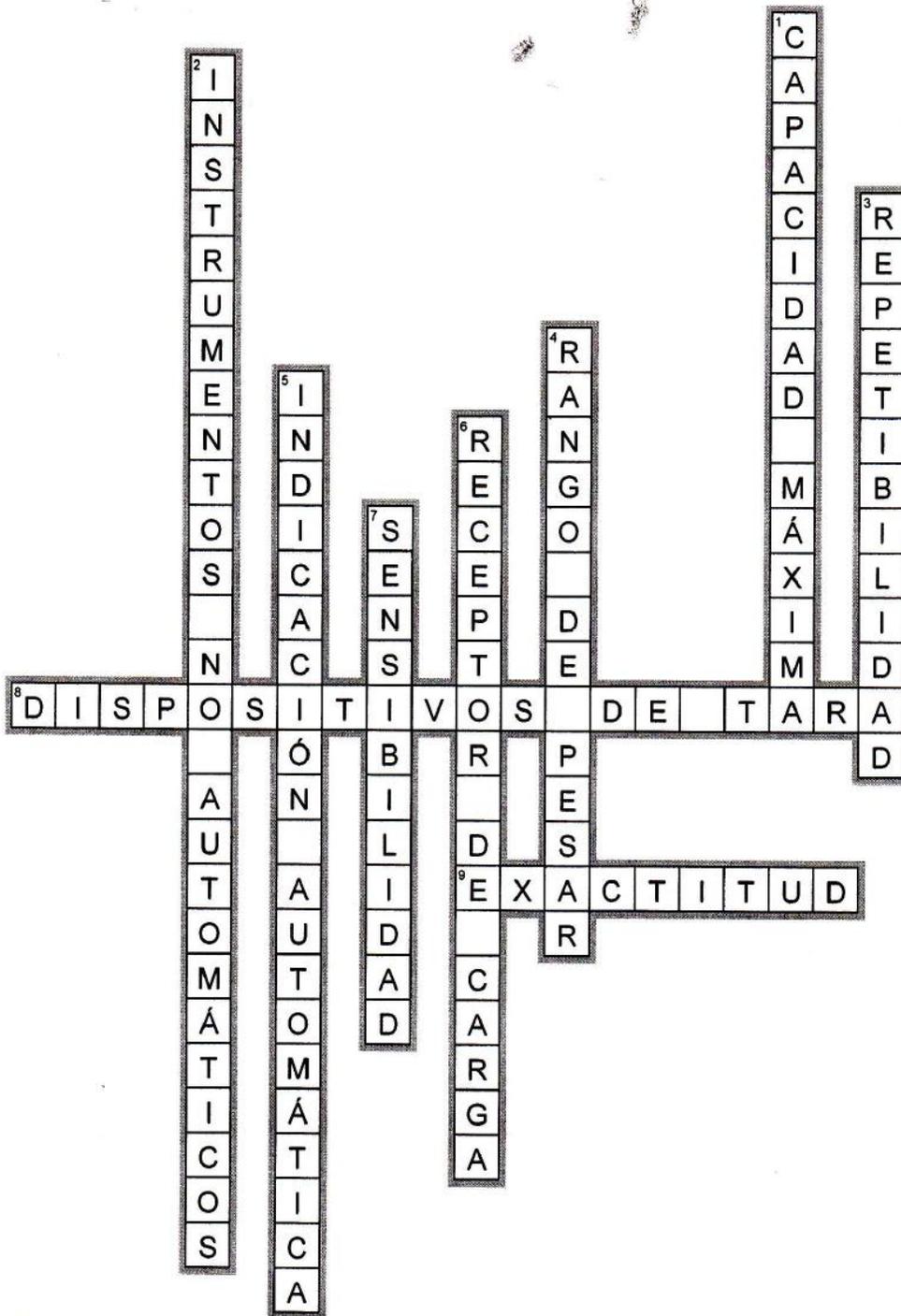
## Parte a

Indicación en media $I_{m-p}$	Volumen de muestra	Volumen de patrón	Masa Real de Muestra $M_m$	Masa convencional de muestra $m_{cm}$	Error
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
0,0100	0,0126	0,0126	100,00989	100,0098	0,0099
0,0000	0,0252	0,0252	199,99988	199,9997	-0,0002
-0,0050	0,0252	0,0252	199,99480	199,9946	-0,0052
0,0050	0,0629	0,0629	500,00471	500,0042	0,0045
0,0233	0,1258	0,1258	1000,02254	1000,0216	0,0224
0,0650	0,2516	0,2516	2000,06780	2000,0659	0,0631

## Parte b

Indicación en media $I_{m-p}$	Volumen de muestra	Volumen de patrón	Masa Real de Muestra $M_m$	Masa convencional de muestra $m_{cm}$	Error
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
-0,0017	0,0003	0,0003	1,99835	1,9983	-0,0017
0,0000	0,0003	0,0003	2,00001	2,0000	0,0000
-0,0017	0,0006	0,0006	4,99834	4,9983	-0,0017
-0,0033	0,0013	0,0013	9,99667	9,9967	-0,0033
0,0033	0,0025	0,0025	20,00333	20,0033	0,0033
0,0000	0,0025	0,0025	20,00001	20,0000	0,0000
0,0017	0,0063	0,0063	50,00148	50,0014	0,0016

Ejercicio 4



### Ejercicio 5

- |   |   |       |  |
|---|---|-------|--|
| 1 | d=0,1 µg  | ( 5 ) | Instrumentos de funcionamiento no automático   |
| 2 | sensibilidad  | ( 6 ) | Propiedad de la balanza de mantener en todo el rango de pesar una curva característica lineal.                                       |
| 3 | Reproducibilidad  | ( 4 ) | Graduado con dispositivo auxiliar de indicación  |
| 4 | e=d   | ( 2 ) | Relación entre la variación en la indicación del instrumento ( $\Delta L$ ) y la variación de la carga que la genera ( $\Delta m$ ). |
| 5 | Durante la pesada, se requiere de la intervención del operador ya sea para colocar o retirar la carga del receptor de carga, o para obtener el resultado de la pesada | ( 1 ) | Ultramicroanalíticas   |
| 6 | Exactitud   | ( 3 ) | Realizan 10 mediciones repetidas   |

### Ejercicio 6

#### Parte a

S	0,00008	S	0,00005
---	---------	---	---------

<b>Máxima desviación de las repetibilidades</b>	0,00008
---	---------

<b>70</b>
<b>Difer. entre indicaciones</b>
0,0004
-0,0004
-0,0003
0,0002
0,0004

Puntos comprobados	Valor de la masa convencional de los patrones	Indicaciones del instrumento calibrado	Error de indicación
--------------------	---	--	---------------------

<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
0	0,100	0,010	-0,090
10	10,000	10,000	0,000
50	50,000	49,999	-0,001
150	150,000	149,999	-0,001
210	210,000	209,997	-0,003

Parte b

S	0,00002	S	0,00005
---	---------	---	---------

<b>Máxima desviación de las repetibilidades</b>	0,00005
---	---------

<b>Difer. entre indicaciones</b>
0,000
0,000
0,000
0,000
0,0003

<b>Puntos comprobados</b>	<b>Valor de la masa convencional de los patrones</b>	<b>Indicaciones del instrumento calibrado</b>	<b>Error de indicación</b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
0	0,010002	0,01	0,000
10	9,999984	10,00	0,000
50	50,000039	50,00	0,001
150	149,999938	150,00	0,000
210	209,999924	210,00	-0,001

Ejercicio 7

Parte a

<b>Valor Nominal</b>	<b>Error convencional de la pesa <math>e_{cm}</math></b>	<b>Incertidumbre Expandida con <math>k = 2</math></b>
<b>G</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
<b>2</b>	<b>-0,0017</b>	<b>0,0834</b>

<b>2*</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0825</b>
<b>5</b>	<b>-0,0017</b>	<b>0,0908</b>
<b>10</b>	<b>-0,0033</b>	<b>0,0906</b>
<b>20</b>	<b>0,0033</b>	<b>0,0906</b>
<b>20*</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0909</b>
<b>50</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0920</b>

Parte b

<b>Valor Nominal</b>	<b>Error convencional de la pesa <math>e_{cm}</math></b>	<b>Incertidumbre Expandida con <math>k = 2</math></b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
<b>100</b>	<b>0,0099</b>	<b>0,0840</b>
<b>200</b>	<b>-0,0002</b>	<b>0,0819</b>
<b>200*</b>	<b>-0,0052</b>	<b>0,0923</b>
<b>500</b>	<b>0,0045</b>	<b>0,0913</b>
<b>1000</b>	<b>0,0224</b>	<b>0,0930</b>
<b>2000</b>	<b>0,0631</b>	<b>0,1112</b>

Parte c

<b>Puntos comprobados</b>	<b>Error de indicación</b>	<b>Incertidumbre Expandida <math>k = 2</math></b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
0	-0,090	0,000
10	0,000	0,000
50	-0,001	0,000
150	-0,001	0,001
210	-0,003	0,001

Parte d

<b>Puntos comprobados</b>	<b>Error de indicación</b>	<b>Incertidumbre Expandida <math>k = 2</math></b>
<b>g</b>	<b>g</b>	<b>g</b>
0	0,000	0,001
10	0,000	0,001
50	0,001	0,001
150	0,000	0,001
210	-0,001	0,001