

Análisis de la variabilidad del error de masa convencional en la calibración de pesas de 5 kg, 10 kg y 20 kg con arreglos de 1 kg

Analysis of the variability of conventional mass error in the calibration of 5 kg, 10 kg and 20 kg weights with 1 kg arrays

Análise da variabilidade do erro da massa convencional na calibração de pesos de 5 kg, 10 kg e 20 kg com matrizes de 1 kg

 KATHERINE QUEZADA (1)

 DIMAS GRACIA (1)


 ABDIEL LÓPEZ (1)

 JOSÉ DÍAZ (1)

 ANÍBAL CANDELARIA (1)

 EDWIN AIZPURUA (1)

(1) Centro Nacional de Metrología de Panamá (CENAMEP AIP), Panamá.

RECIBIDO: 22/10/2024 → APROBADO: 25/11/2024  kquezada@cenamep.org.pa

RESUMEN

En este estudio se evaluaron las desviaciones típicas y gráficas de error obtenidas de la medición de cinco metrólogos al utilizar distintos arreglos de calibración en valores nominales de 5 kg, 10 kg y 20 kg de clase F_1 , haciendo uso de masas de 1 kg de clase E_2 . Se realizaron dos arreglos para 5 kg y tres arreglos para 10 kg y 20 kg. A través de matrices de índice de compatibilidad, se llevó a cabo un estudio de reproducibilidad para los distintos arreglos con los respectivos valores nominales. Los resultados evidenciaron que para la pesa de 5 kg el arreglo 1 demostró ser el más efectivo, mostrando una desviación típica menor en comparación con el arreglo 2, lo que sugiere menor variabilidad entre los metrólogos. Para la pesa de 10 kg, el arreglo 3 presentó la desviación típica más baja, destacándose como la opción más reproducible. En las calibraciones de 20 kg, el arreglo 2 fue identificado como el más recomendado, presentando una menor desviación típica en comparación con los arreglos 1 y 3. Estos hallazgos resaltan la importancia de elegir el arreglo de pesas más adecuado para calibraciones en este alcance. De esa manera, se puede asegurar la reproducibilidad en este tipo de mediciones, asegurando la calidad y fiabilidad del método de medición empleado.

Palabras clave: calibración de pesas, desviación típica, índices de compatibilidad, metrología, reproducibilidad.

ABSTRACT

In this study, the standard deviations and error plots obtained from the measurement of five metrologists using different calibration arrays at nominal values of 5 kg, 10 kg and 20 kg of class F_1 using 1 kg masses of class E_2 were evaluated. Two arrays for 5 kg and three arrays for 10 kg and 20 kg were performed. Through compatibility index matrices, a reproducibility study was carried out for the different arrays with the respective nominal values. The results showed that, for the 5 kg weight, array 1 proved to be the most effective, showing a lower standard deviation compared to array 2, suggesting less variability among metrologists. For the 10 kg weight, array 3 presented the lowest standard deviation, standing out as the most reproducible option. For the 20 kg calibrations, arrangement 2 was identified as the most recommended, presenting a lower standard deviation compared to arrangements 1 and 3. These findings highlight the importance of choosing the most appropriate weight arrangement for this type of calibration in this scope. In this way, reproducibility can be ensured in this type of measurement, assuring the quality and reliability of the measurement method used.

Keywords: weight calibration, standard deviation, compatibility indices, metrology, reproducibility.

RESUMO

Neste estudo, foram avaliados os desvios-padrão e os gráficos de erro obtidos a partir das medições de cinco metrologistas utilizando diferentes matrizes de calibração com valores nominais de 5 kg, 10 kg e 20 kg da classe F_1 , usando massas de 1 kg da classe E_2 . Foram efetuadas duas matrizes para 5 kg e três matrizes para 10 kg e 20 kg. Através de matrizes de índice de compatibilidade, foi efetuado um estudo de reprodutibilidade para as diferentes matrizes com os respectivos valores nominais. Os resultados mostraram que, para o peso de 5 kg, a matriz 1 revelou-se a mais eficaz, apresentando um desvio padrão inferior ao da matriz 2, o que sugere uma menor variabilidade entre metrologistas. Para o peso de 10 kg, a disposição 3 apresentou o menor desvio-padrão, destacando-se como a opção mais reprodutível. Para as calibrações de 20 kg, a disposição 2 foi identificada como a mais recomendada, apresentando um menor desvio-padrão em comparação com as disposições 1 e 3. Estes resultados realçam a importância de escolher a disposição de pesos mais adequada para este tipo de calibração neste âmbito. Desta forma, é possível assegurar a reprodutibilidade neste tipo de medição, garantindo a qualidade e fiabilidade do método de medição utilizado.

Palavras-chave: calibração de pesos, desvio padrão, índices de compatibilidade, metrologia, reprodutibilidade.

INTRODUCCIÓN

La determinación de los valores de masa de las pesas mediante las calibraciones es de gran importancia en la sociedad actual, debido a su aplicabilidad en actividades tanto de

investigación como industriales. Por esta razón, surge la necesidad de conocer la masa de manera cuantitativa, incrementado el uso de patrones, instrumentos y metodologías para determinarla (Chinchilla et al., 2001; Talavera y Pezet, 2002; Rocío y Pellecer, 2020).

El concepto "Capacidad de Medición y Calibración (CMC)" hace referencia a la confiabilidad de las mediciones y su dependencia de diferentes factores, entre ellos, el método de medición o calibración utilizado. El Centro Nacional de Metrología de Panamá (CENAMEP AIP, una asociación de interés público) cuenta con 20 CMC en la magnitud de masa, las cuales están registradas en la base de datos KCDB del Bureau Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) (s.d.), para la calibración de pesas clase F_1 desde 1 mg a 2 kg, según sus incertidumbres declaradas (Centro Nacional de Metrología de Panamá, s.d.).

La clasificación de las pesas, de acuerdo con la Recomendación Internacional R 111-1 de la Organización Internacional de Metrología Legal (2004b), se basa en sus clases de exactitud: E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} y M_3 , siendo E_1 la clase de mayor exactitud y M_3 la de menor exactitud. El método de calibración de pesas utilizado en el CENAMEP AIP se conoce como "doble sustitución", también llamado método ABBA, y consiste en comparar la pesa bajo calibración con una o más pesas de referencia, asegurando que las cargas sean de igual valor nominal. Es fundamental que los errores máximos permisibles (EMP) de la pesa de referencia no superen un tercio del EMP de la pesa bajo calibración. El centro cuenta con pesas de clase F_1 para los valores nominales de 5 kg, 10 kg y 20 kg. Sin embargo, para calibrar estos valores nominales se utiliza un conjunto de pesas de 1 kg de clase E_2 . Dado que el centro no dispone de pesas sólidas de clase E_2 para los valores nominales de 5, 10 y 20 kg de clase F_1 , se utiliza un conjunto de pesas de 1 kg de clase E_2 para realizar la comparación.

Además, en las calibraciones se presenta un parámetro conocido como incertidumbre de medida, la cual se puede definir como la duda cuantificable de una medición. En la calibración de pesas, las incertidumbres a considerar están relacionadas a diversos factores, como las características del instrumento de pesaje utilizado (comparador de masa), las propiedades del patrón y de la pesa a calibrar. Estas incertidumbres se expresan en la Ecuación 1 (Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), 2004a; Centro Español de Metrología, 2008; Moroto et al., s.d., pp. 4-6), de la siguiente manera:

$$u^2(m_{ct}) = u^2(m_{cp}) + u^2(\delta m_{cr}) + (m_{cp} + \delta m_{cr})^2 \cdot u^2(C) + u^2(\overline{\Delta I}) + u^2(\delta d) + u^2(\delta e) \quad (1)$$

Donde:

m_{ct} : es la masa convencional de la incógnita.

m_{cp} : es la masa convencional del patrón.

δm_{cr} : deriva de la masa convencional de la referencia.

C : es la corrección por empuje del aire.

$\overline{\Delta I}$: es la media de la diferencia de indicación.

δd : es la resolución del comparador de masa.

δe : es el error de excentricidad del comparador.

En este sentido, la excentricidad del comparador se considera despreciable si la muestra y el patrón son situados en el centro del dispositivo receptor de carga. Además,

la sensibilidad del comparador se evalúa mediante la prueba de sensibilidad, que permite determinar su capacidad para detectar variaciones mínimas de carga (Centro Español de Metrología, 2020, p. 10).

Por otro lado, la evaluación de la incertidumbre se clasifica en dos tipos: tipo A y tipo B. La incertidumbre tipo A corresponde a la evaluación de una componente de la incertidumbre de medida mediante un análisis estadístico de los valores obtenidos bajo condiciones de medición definidas, y puede ser utilizada para condiciones de reproducibilidad tal como se muestra en la Ecuación 2.

$$u(q) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n s(q_k) \quad (2)$$

Donde:

$s(q_k)$: es la desviación estándar, obtenida a partir de la Ecuación 3.

$$s(q_k) = \frac{\sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})}{\sqrt{n-1}} \quad (3)$$

n : es el número total de mediciones realizadas.

En contraste, la evaluación tipo B aborda la incertidumbre de medida de manera distinta. Esta evaluación se basa en información asociada a valores publicados y reconocidos como el valor de un material de referencia certificado, datos obtenidos de un certificado de calibración, información sobre la deriva, y datos relacionados con la clase de exactitud de un instrumento de medida verificado, así como límites establecidos a partir de la experiencia del personal (Centro Español de Metrología, 2012, p. 35).

De acuerdo con el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM), elaborado por el Centro Español de Metrología (2012), las condiciones de reproducibilidad de una medición incluyen diferentes lugares, operadores, sistemas de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos u objetos similares. La reproducibilidad se define como el grado de concordancia entre los resultados de las mediciones del mismo mensurando realizadas bajo diferentes condiciones, tal como lo describe la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medidas del Centro Español de Metrología (2008) y Díaz (2018, p. 12).

Además, Becerra (2003) indica que una forma de evaluar la reproducibilidad entre diferentes miembros del personal técnico es mediante el uso del error normalizado, tal como se presenta en la Ecuación 4:

$$E_n = \frac{X_2 - X_1}{\sqrt{U_2^2 + U_1^2}} \quad (4)$$

A partir de esta ecuación, es posible calcular los índices de compatibilidad. El índice de compatibilidad, o grado de equivalencia, se define como la diferencia entre los valores declarados por los participantes, considerando la incertidumbre expandida de esa

diferencia. Para que los resultados se consideren compatibles, esta diferencia debe ser menor que la incertidumbre correspondiente (Luján, Pezet y Becerra, 2006).

Esta investigación tuvo como objetivo analizar el efecto de la variabilidad del error de masa convencional en arreglos de pesas patrón de 1 kg clase E₂, en calibraciones de 5 kg, 10 kg y 20 kg de clase F₁, enfocándose en la reproducibilidad de los resultados entre diferentes metrólogos. La importancia de este tipo de estudio radica en establecer un método uniforme de trabajo para el laboratorio, independientemente del metrólogo que realice las mediciones, a fin de contribuir a reducir posibles errores sistemáticos asociados con cambios en los arreglos de las pesas de 1 kg.

Este estudio toma relevancia en el ámbito de las calibraciones de 1 kg para el área científica y la industria, permitiendo a los profesionales del sector identificar la manera más eficiente de realizar calibraciones con este tipo de arreglos y hacer uso de un sistema de medición más confiable.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sobre el protocolo de la comparación

Seis metrólogos del Laboratorio Secundario de Masas de la Coordinación de Magnitudes Mecánicas del CENAMEP AIP fueron los encargados de determinar los parámetros iniciales del estudio, como los alcances a estudiar, la técnica de calibración a utilizar, los arreglos a ejecutar, los patrones, las incógnitas y los comparadores de masa. Durante la toma de datos participaron cinco metrólogos con diferentes años de experiencia en esta magnitud; cada uno estuvo directamente involucrado en la parte experimental del estudio y en la redacción de este artículo. El sexto metrólogo asumió la responsabilidad de llevar el control y seguimiento de todo el proceso de calibración, asegurando que se siguiera el procedimiento establecido para el desarrollo del estudio. Además, al finalizar la toma de datos, el sexto metrólogo fue el encargado del análisis estadístico y la creación de gráficos que facilitaron la interpretación y visualización de los resultados.

Este estudio de metrología fue de corte transversal; se inició el 2 de febrero de 2024 y la toma de datos finalizó el 22 de marzo del mismo año. De acuerdo con el procedimiento interno del laboratorio, es fundamental mantener condiciones ambientales estables; en este caso, se establecieron rangos de temperatura entre 18 °C y 27 °C y de humedad entre 40 % y 60 %. Durante el estudio, las condiciones se mantuvieron dentro de estos parámetros, con temperaturas entre 18 °C y 22 °C y humedad entre 43 % y 52 %, cumpliendo así con los límites establecidos.

Los metrólogos participantes presentan distintos niveles de experiencia: uno cuenta con 8 años, otro con 6 años, uno más con 2 años y tres tienen 1 año de experiencia. Esta diversidad en la experiencia de los metrólogos aporta un valor significativo al estudio, ya que permite analizar cómo los diferentes arreglos influyen en las mediciones, sin que el tiempo de experiencia sea un factor determinante, sino centrándose en la técnica establecida.

Patrones y equipos utilizados

Se evaluaron los equipos actualmente en uso en el laboratorio. Posteriormente, se realizaron los respectivos arreglos de pesas de 1 kg con clase de exactitud E_2 en diferentes alcances. Las pesas identificadas se clasifican de acuerdo con los códigos asignados por el centro, en cumplimiento con su Sistema de Gestión de Calidad, como CMP-M1-183, CMP-M1-184, CMP-M1-185 y CMP-M1-186. Cada conjunto cuenta con cinco pesas de 1 kg, de clase de exactitud E_2 según la Recomendación Internacional OIML R 111-1 (Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), 2004b); estas pesas se utilizaron como patrón. Los equipos identificados como CMP-M1-115, CMP-M1-116 y CMP-M1-117, con valores nominales de 5 kg, 10 kg y 20 kg respectivamente, con una clase de exactitud F_1 según la OIML R 111-1 se utilizaron como incógnitas, tal como se presenta en las Figuras 1 y 2.



FIGURA 1. Pesas utilizadas como patrón con identificación CMP-M1-183/184/185/186.



FIGURA 2. Pesas utilizadas como incógnitas con identificación CMP-M1-115/116/117.

Los cinco metrólogos directamente involucrados realizaron el estudio con tres valores nominales: 5 kg, 10 kg y 20 kg. A diferencia de los tres arreglos considerados para 10 kg y 20 kg, solo se consideraron dos arreglos de pesas para el valor nominal de 5 kg, ya que los metrólogos de mayor experiencia determinaron que no comprometían la estabilidad

de los arreglos de pesas de 1 kg. En la Figura 3 se presentan los diferentes arreglos utilizados para cada uno de los valores nominales.









Valor nominal	Arreglo 1	Arreglo 2	Arreglo 3
5 kg			N/A
10 kg			
20 kg			

FIGURA 3. Arreglos empleados con los respectivos patrones para las calibraciones de pesas de 5 kg, 10 kg y 20 kg. El color negro corresponde al grupo de pesas de 1 kg, que se ubicaron en la base; el azul al grupo intermedio; y el rojo a la(s) pesa(s) superior(es).

Se utilizaron dos comparadores para la calibración de los diferentes arreglos de pesas. En este sentido, el comparador de masa Mettler Toledo XPE10003SC, con un alcance máximo de hasta 10.1 kg, se utilizó para calibrar los diferentes arreglos de pesas de 5 kg y 10 kg, mientras que el comparador Mettler Toledo XPR26003LC, con un alcance máximo de hasta 26.1 kg, se utilizó para los tres arreglos de 20 kg. Esta sección del procedimiento se muestra en la Figura 4.

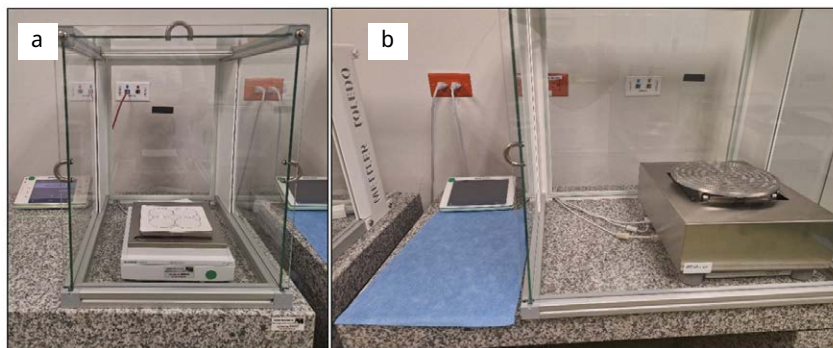


FIGURA 4. Comparadores utilizados para la calibración de pesas en el rango de 5 kg a 20 kg: a) Mettler Toledo XPE10003SC y b) Mettler Toledo XPR26003LC.

Durante las calibraciones, debido a que cada pesa de 1 kg cuenta con errores de masa convencional distintos, se acordó entre los metrólogos colocarlas en las mismas posiciones para evitar la contribución de variabilidad en la incertidumbre de medida debido a la excentricidad. Además, en el CENAMEP AIP se realizaron mediciones de sensibilidad de los comparadores durante sus verificaciones, con el fin de confirmar que los equipos cumplieran con las especificaciones establecidas por el fabricante.

La toma de datos se registró en la hoja de cálculo identificada como CL-M1-009. Este documento en Excel permite calcular el valor de masa convencional con el error y la incertidumbre, utilizando el método ABBA a lo largo de tres ciclos. Este método sigue una secuencia que alterna entre una pesa de referencia (A) y una incógnita (B), manteniendo el siguiente orden: A – B – B – A.

Con los datos del error y la incertidumbre de la masa convencional obtenidos de la hoja de cálculo, se elaboraron las distintas matrices del índice de compatibilidad o grado de equivalencia. Se utilizó la Ecuación 4, que trata del error normalizado, para realizar una comparación entre los metrólogos involucrados para cada uno de los arreglos realizados.

Finalmente, se realizó una comparación de los diferentes arreglos para cada valor nominal, calculando la desviación típica de los errores de masa convencional para identificar el arreglo con menor desviación típica. De esta manera, se pudo determinar el arreglo más reproducible.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de las comparaciones

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras la toma de datos. En las Tablas 1, 2 y 3 se muestran los errores de masa convencional EMC_i y su incertidumbre U de cada metrólogo, para cada uno de los valores nominales y sus respectivos arreglos. Además, se incluye la desviación estándar s de los errores obtenidos.

Las desviaciones estándar obtenidas en cada una de las tres tablas para el error de masa convencional permiten comparar y evaluar la consistencia de los diferentes arreglos para cada valor nominal. Este análisis es fundamental para identificar el arreglo más adecuado, ya que una menor desviación estándar indica mayor precisión y menor variabilidad en las mediciones del error de masa convencional, asegurando que los resultados se alinean con los estándares de calidad requeridos.

TABLA 1. Error de masa convencional obtenido durante la calibración de la pesa de 5 kg.

Error de masa convencional						
Participantes	Arreglo 1			Arreglo 2		
	EMC_i (mg)	$U (k = 2)$ (mg)	s (mg)	EMC_i (mg)	$U (k = 2)$ (mg)	s (mg)
Metrólogo I	1.0	2.9	1.1	2.0	3.2	2.8
Metrólogo II	0.0	3.2		1.0	2.7	
Metrólogo III	-1.0	2.7		-5.0	3.4	
Metrólogo IV	1.0	2.7		0.0	2.7	
Metrólogo V	2.0	2.9		1.0	2.8	

TABLA 2. Error de masa convencional obtenido durante la calibración de la pesa de 10 kg.

Error de masa convencional									
Participantes	Arreglo 1			Arreglo 2			Arreglo 3		
	EMC _i (mg)	U (k = 2) (mg)	s (mg)	EMC _i (mg)	U (k = 2) (mg)	s (mg)	EMC _i (mg)	U (k = 2) (mg)	s (mg)
Metrólogo I	1.0	5.2	3.2	3.0	5.5	2.4	-1.0	5.3	2.3
Metrólogo II	1.0	5.3		1.0	5.5		0.0	5.3	
Metrólogo III	-6.0	5.7		1.0	5.3		-2.0	5.3	
Metrólogo IV	0.0	5.5		0.0	5.5		1.0	5.6	
Metrólogo V	2.0	5.2		6.0	5.4		4.0	5.5	

TABLA 3. Error de masa convencional obtenido durante la calibración de la pesa de 20 kg.

Error de masa convencional									
Participantes	Arreglo 1			Arreglo 2			Arreglo 3		
	EMC _i (mg)	U (k = 2) (mg)	s (mg)	EMC _i (mg)	U (k = 2) (mg)	s (mg)	EMC _i (mg)	U (k = 2) (mg)	s (mg)
Metrólogo I	-13.0	10.4	6.7	-11.0	10.5	3.8	-11.0	10.4	5.4
Metrólogo II	-13.0	10.3		-11.0	10.5		-11.0	10.3	
Metrólogo III	-13.0	10.4		-13.0	10.3		-10.0	10.3	
Metrólogo IV	-20.0	10.3		-16.0	10.4		-14.0	10.3	
Metrólogo V	-28.0	10.5		-20.0	10.4		-23.0	10.4	

Por otra parte, las Figuras 5, 6 y 7 muestran la representación de los datos presentados en las Tablas 1, 2 y 3, respectivamente. En estas gráficas se puede observar la tendencia de los resultados obtenidos por cada metrólogo. Las líneas horizontales rojas indican los límites establecidos en cada punto, calculados a partir de la incertidumbre asociada al error de masa convencional.

En la Figura 5 se observa que los errores obtenidos se encuentran dentro de los límites definidos por cada operador, lo que subraya la consistencia en las mediciones realizadas en los arreglos de 5 kg. De igual forma, en la Figura 6, los errores también se mantienen dentro de los límites permitidos, indicando un control adecuado de la incertidumbre en las calibraciones de 10 kg.

En la Figura 7 los tres arreglos muestran una tendencia similar, lo que indica una buena reproducibilidad entre los metrólogos para cada uno de los diferentes arreglos utilizados en las calibraciones de 20 kg. Aunque los tres arreglos presentan una dispersión considerable, el arreglo 2 se destacó al mostrar la menor desviación estándar, tal como se muestra en la Tabla 3.

La concordancia de los errores dentro de los límites y la consistencia observada en todos los arreglos refuerzan la fiabilidad del método de calibración empleado. Esto tiene implicaciones prácticas importantes, ya que garantiza que los resultados de las calibraciones realizadas en el centro cumplen con los estándares de exactitud requeridos para la industria panameña, especialmente en procesos que demanden alta exactitud.

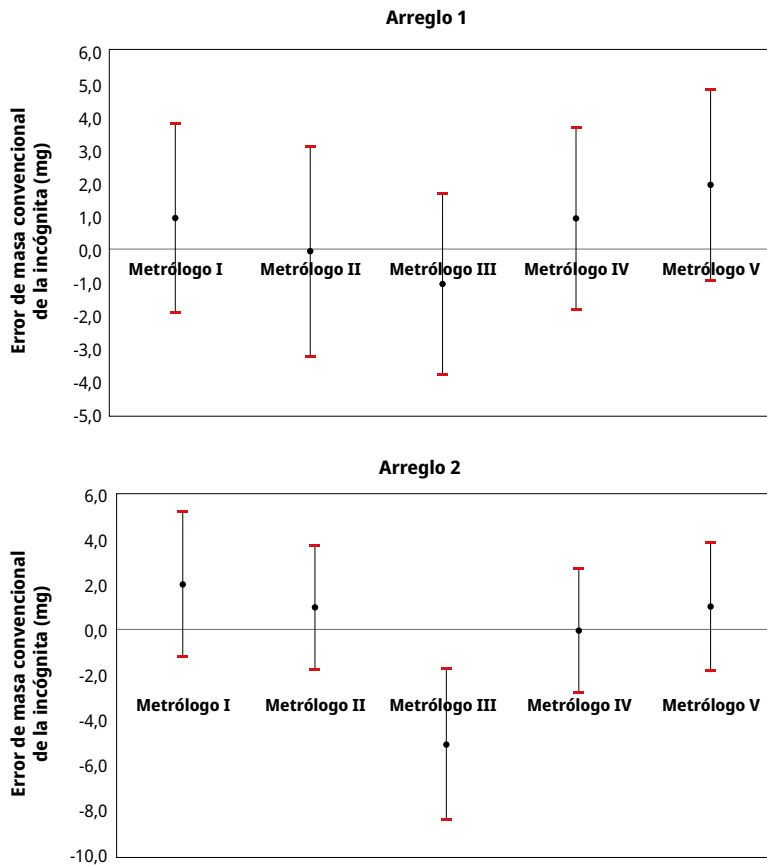


FIGURA 5. Comparación de los errores de masa convencional entre los metrologos obtenidos durante la calibración de la pesa de 5 kg.

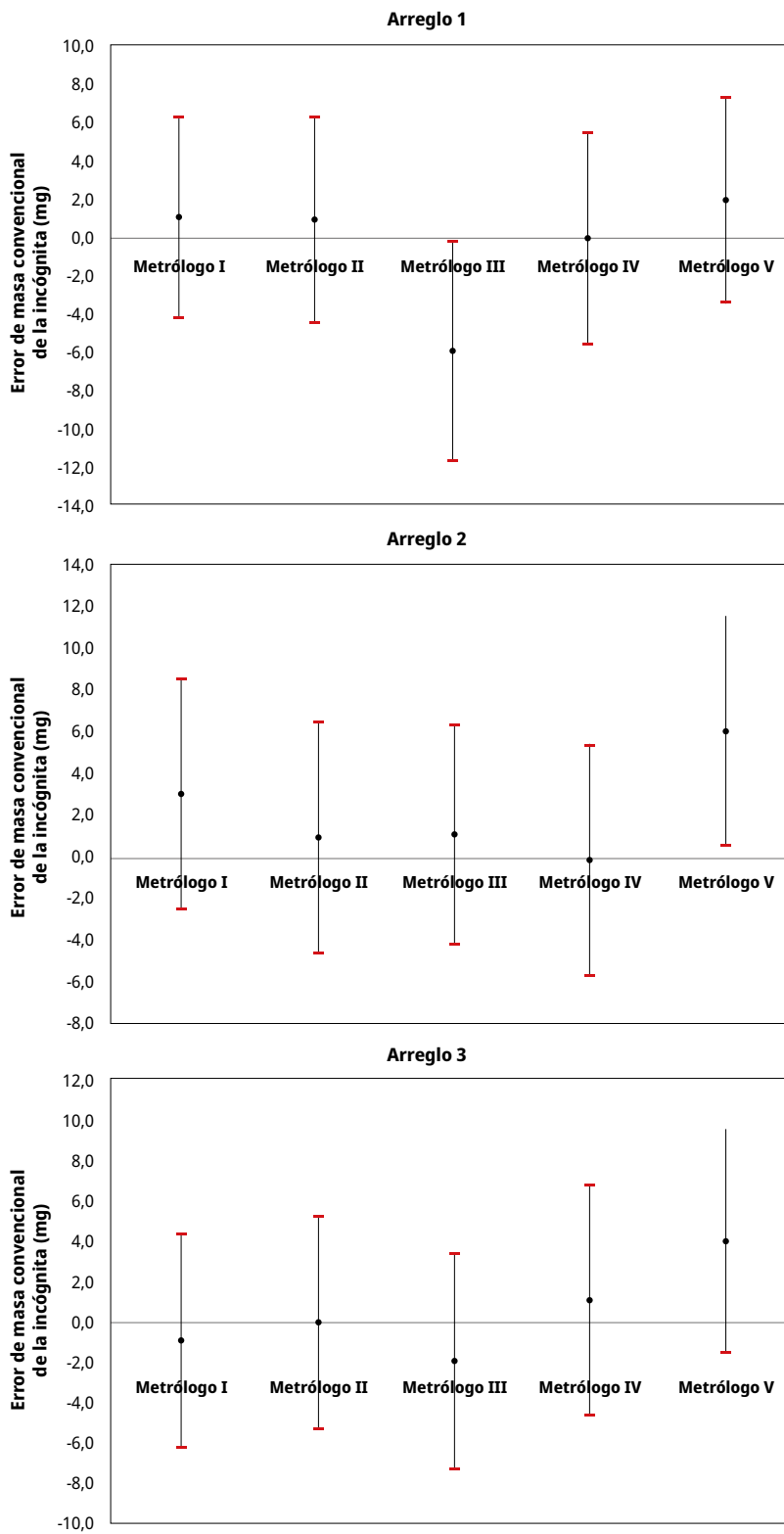


FIGURA 6. Comparación de los errores de masa convencional entre los metrologos obtenidos durante la calibración de la pesa de 10 kg.

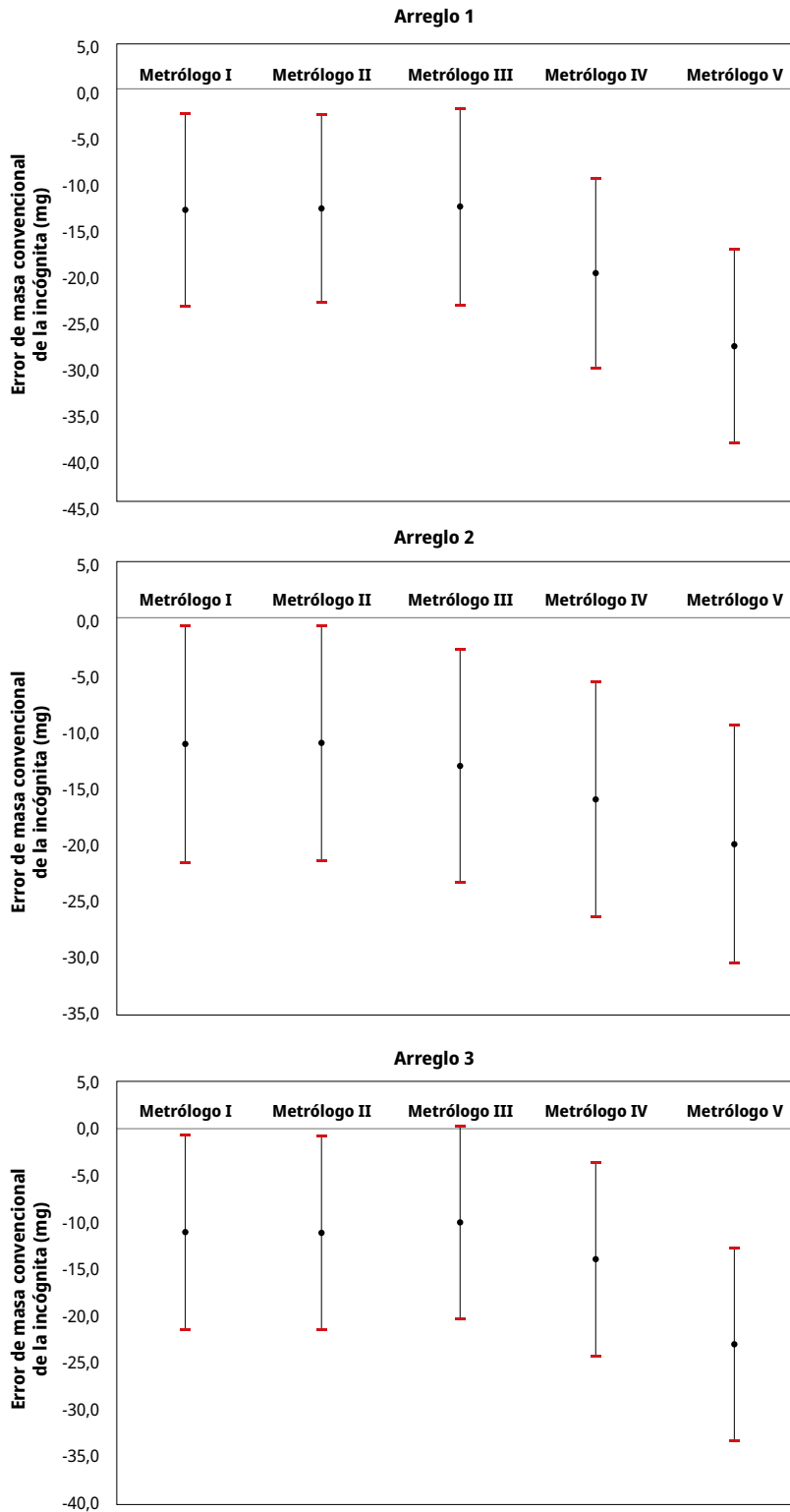


FIGURA 7. Comparación de los errores de masa convencional entre los metrologos obtenidos durante la calibración de la pesa de 20 kg.

Por otra parte, en las Tablas 4, 5 y 6 se presentan las matrices de los índices de compatibilidad para los distintos valores nominales y sus respectivos arreglos.

TABLA 4. Matriz de índices de compatibilidad para el valor nominal de 5 kg.

Matriz de índices de compatibilidad					
Arreglo 1					
Participantes	Metrólogo I	Metrólogo II	Metrólogo III	Metrólogo IV	Metrólogo V
Metrólogo I	0.0	0.2	0.5	0.0	0.2
Metrólogo II	0.2	0.0	0.2	0.2	0.5
Metrólogo III	0.5	0.2	0.0	0.5	0.8
Metrólogo IV	0.0	0.2	0.5	0.0	0.2
Metrólogo V	0.2	0.5	0.8	0.2	0.0
Arreglo 2					
Metrólogo I	0.0	0.2	1.5	0.5	0.2
Metrólogo II	0.2	0.0	1.4	0.3	0.0
Metrólogo III	1.5	1.4	0.0	1.2	1.4
Metrólogo IV	0.5	0.3	1.2	0.0	0.2
Metrólogo V	0.2	0.0	1.4	0.2	0.0

TABLA 5. Matriz de índices de compatibilidad para el valor nominal de 10 kg.

Matriz de índices de compatibilidad					
Arreglo 1					
Participantes	Metrólogo I	Metrólogo II	Metrólogo III	Metrólogo IV	Metrólogo V
Metrólogo I	0.0	0.0	0.9	0.1	0.1
Metrólogo II	0.0	0.0	0.9	0.1	0.1
Metrólogo III	0.9	0.9	0.0	0.8	1.0
Metrólogo IV	0.1	0.1	0.8	0.0	0.3
Metrólogo V	0.1	0.1	1.0	0.3	0.0
Arreglo 2					
Metrólogo I	0.0	0.3	0.3	0.4	0.4
Metrólogo II	0.3	0.0	0.0	0.1	0.6
Metrólogo III	0.3	0.0	0.0	0.1	0.7

Matriz de índices de compatibilidad					
Metrólogo IV	0.4	0.1	0.1	0.0	0.8
Metrólogo V	0.4	0.6	0.7	0.8	0.0
Arreglo 3					
Metrólogo I	0.0	0.1	0.1	0.3	0.7
Metrólogo II	0.1	0.0	0.3	0.1	0.5
Metrólogo III	0.1	0.3	0.0	0.4	0.8
Metrólogo IV	0.3	0.1	0.4	0.0	0.4
Metrólogo V	0.7	0.5	0.8	0.4	0.0

TABLA 6. Matriz de índices de compatibilidad para el valor nominal de 20 kg.

Matriz de índices de compatibilidad					
Arreglo 1					
Participantes	Metrólogo I	Metrólogo II	Metrólogo III	Metrólogo IV	Metrólogo V
Metrólogo I	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0
Metrólogo II	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0
Metrólogo III	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0
Metrólogo IV	0.5	0.5	0.5	0.0	0.5
Metrólogo V	1.0	1.0	1.0	0.5	0.0
Arreglo 2					
Metrólogo I	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6
Metrólogo II	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6
Metrólogo III	0.1	0.1	0.0	0.2	0.5
Metrólogo IV	0.3	0.3	0.2	0.0	0.3
Metrólogo V	0.6	0.6	0.5	0.3	0.0
Arreglo 3					
Metrólogo I	0.0	0.0	0.1	0.2	0.8
Metrólogo II	0.0	0.0	0.1	0.2	0.8
Metrólogo III	0.1	0.1	0.0	0.3	0.9
Metrólogo IV	0.2	0.2	0.3	0.0	0.6
Metrólogo V	0.8	0.8	0.9	0.6	0.0

Discusión sobre los arreglos realizados

En las Tablas 1, 2 y 3 se presentan las desviaciones típicas obtenidas a partir de los datos registrados por cada metrólogo para los diferentes arreglos empleados en los distintos valores nominales. La Tabla 1 muestra que la desviación típica del arreglo 1 es más baja que la del arreglo 2, lo que indica que el arreglo 1 es el más adecuado, ya que presenta menos variabilidad entre los participantes para la calibración la pesa de 5 kg.

Por otro lado, en la Tabla 2 se observa que la desviación típica del arreglo 3 es la más baja, lo que sugiere que este arreglo es la mejor opción para los metrólogos al realizar una calibración con la pesa de 10 kg. Asimismo, la Tabla 3 muestra que el arreglo 2 es el recomendado para calibraciones de pesas de 20 kg, ya que presenta menos desviaciones en comparación con los arreglos 1 y 3.

Por otra parte, las Figuras 5, 6 y 7 presentan los resultados de las mediciones realizadas por los distintos metrólogos. Estos datos fueron obtenidos a partir de las matrices de los índices de compatibilidad, lo que permitió observar y relacionar a cada metrólogo involucrado para realizar un estudio de reproducibilidad para los distintos arreglos con los respectivos valores nominales.

En la Figura 5 se presentan los resultados para los arreglos 1 y 2 con un valor nominal de 5 kg. En este caso, se observa que el metrólogo III se desvía notablemente de los demás en el arreglo 2, lo cual está posiblemente asociado al sistema utilizado durante esta calibración, que pudo haber afectado la comodidad de operación del metrólogo.

Por su parte, la Figura 6 muestra una tendencia similar al mencionado anteriormente en el arreglo 1 de 10 kg. Por otro lado, los dos arreglos restantes muestran una tendencia similar entre sí. Finalmente, en la Figura 7 se muestra una tendencia muy similar entre los distintos arreglos. En la calibración de la pesa de 20 kg, al variar los arreglos, se mantiene una reproducibilidad para cada metrólogo.

Las Tablas 4, 5 y 6 representan las matrices de índices de compatibilidad basadas en el error normalizado de los resultados obtenidos para el error de masa convencional. En la Tabla 4, el arreglo 1 muestra que $|E_n| \leq 1$, lo que indica que los resultados entre los metrólogos son consistentes y aceptables. Sin embargo, en el arreglo 2 se observa que $|E_n| > 1$ con relación al metrólogo III, lo que señala que sus resultados se desvían significativamente de los obtenidos por los demás involucrados. En las Tablas 5 y 6, los tres arreglos presentan $|E_n| \leq 1$, lo que confirma que los resultados son aceptables entre todos los metrólogos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio indican que la elección del arreglo de las pesas para una calibración influye significativamente en la exactitud y reproducibilidad de las mediciones realizadas por los metrólogos. Específicamente, el arreglo 1 se destaca como el más efectivo para calibraciones con un valor nominal de 5 kg, mientras que el arreglo 3 es preferible para 10 kg; por su parte, el arreglo 2 es el más adecuado para 20 kg. Además, se observó que las diferencias en la tendencia observada entre los metrólogos, como en el caso del metrólogo III para el arreglo 2 del valor nominal de 10 kg, pueden estar

influenciadas por factores asociados a la comodidad y facilidad al colocar las pesas en el comparador. Estos hallazgos subrayan la importancia de seleccionar el arreglo adecuado para mejorar la exactitud y consistencias en las calibraciones de pesas, optimizando así la eficiencia de los procesos metroológicos.

Los resultados obtenidos por el metrólogo III han generado interrogantes sobre la razón exacta de su desviación. Por consiguiente, se plantea la hipótesis de que factores relacionados con la reproducibilidad y la excentricidad podrían estar influyendo. Para investigar esta posibilidad, se sugiere llevar a cabo estudios adicionales con los arreglos donde se han observado desviaciones significativas en comparación con los demás metrólogos.

Con este estudio, el CENAMEP AIP busca mejorar el servicio de calibración de pesas de 5 kg, 10 kg y 20 kg de clase F₁, con la meta de fortalecer su oferta para la industria panameña. Los resultados han sido utilizados para orientar a los integrantes del Laboratorio Secundario de Masas, contribuyendo a consolidar una línea de investigación y a identificar el arreglo más confiable para este tipo de calibraciones. Esta línea de investigación se enfocó en el estudio de procedimientos de calibración confiables, que le aseguren a la industria panameña que las mediciones realizadas consideran aspectos importantes como la reproducibilidad de los resultados entre diferentes metrólogos. En este marco, el objetivo planteado en este estudio fue cumplido.

A futuro se planea realizar más estudios en torno a los resultados obtenidos. Para continuar con la línea de investigación en el CENAMEP AIP se proyecta realizar investigaciones relacionadas a la susceptibilidad magnética y su posible impacto en este tipo de calibraciones, utilizando pesas de 1 kg. Asimismo, se tiene previsto incluir nuevos arreglos con diferentes valores nominales, ampliando el alcance de los estudios realizados en esta fase.

También se prevé realizar una comparación externa con otro instituto nacional de metrología (INM) para evaluar la exactitud de los datos obtenidos. Estas iniciativas prometen abrir nuevas fronteras en el campo de la metrología, mejorando la fiabilidad de nuestros procesos y posicionando al CENAMEP AIP como un referente en el ámbito de la calibración de pesas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro Nacional de Metrología de Panamá, Asociación de Interés Público (CENAMEP AIP), por facilitar las instalaciones necesarias para la realización de este estudio, a través del Laboratorio Secundario de Masas (M1). También expresamos nuestro agradecimiento a la Coordinación de Magnitudes Mecánicas y a su respectivo Coordinador, el metrólogo José Kuruc, por la orientación técnica para llevar a cabo este estudio que aporta a la infraestructura de la calidad en Panamá. Asimismo, extendemos nuestro sincero agradecimiento al Dr. Jaime Estrella, Coordinador de I+D+i del CENAMEP AIP, por su valiosa orientación durante la revisión final de este manuscrito.

REFERENCIAS

- Becerra, L., 2003. *Control estadístico de las mediciones (Aplicación a la calibración de pesas)* [En línea]. México: CENAM. [Consulta: 12 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.cenam.mx/myd/pages/publicaciones/articulos/doc/Control%20Estad.pdf>
- Bureau Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), (s.d.). *Base de Datos KCDB – CENAMEP AIP* [En línea]. [s.l.]: [s.n.]. [Consulta: 1 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.bipm.org/kcdb/cmc/quick-search?keywords=Panama>.
- Centro Español de Metrología, 2008. *Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida* [En línea]. Madrid: CEM. [Consulta: 6 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>
- Centro Español de Metrología, 2012. *Vocabulario Internacional de Metrología conceptos fundamentales y generales, y términos asociados* [En línea]. 3ra ed. Madrid: CEM. [Consulta: 16 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>
- Centro Español de Metrología, 2020. *Procedimiento ME025 para la determinación del valor convencional de masa* [En línea]. Madrid: CEM. [Consulta: 6 de julio de 2024]. Disponible en: https://www.cem.es/sites/default/files/me025me007-me015__masa_convencional_digital_ed1_0.pdf
- Centro Nacional de Metrología de Panamá, s.d. *Servicios de calibración por coordinación* [En línea]. Panamá: CENAMEP AIP. [Consulta: 21 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.cenamep.org.pa/calibraciones/>
- Chinchilla, C.; Guevara, D. y Quan, F., 2001. *Diagnóstico de la metrología en el área de masas y balanzas de la industria alimenticia* [En línea]. El Salvador: Universidad Don Bosco. [Consulta: 21 de julio de 2024]. Disponible en: <https://rd.udb.edu.sv/server/api/core/bitstreams/580ebc3e-7b1e-4efa-9086-77a6e5a84e31/content>
- Díaz, J., 2018. *Estudio de repetibilidad y reproducibilidad* [En línea]. México: Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga. [Consulta: 24 de julio de 2024]. Disponible en: <https://pabellon.tecnm.mx/CENTRODEINFORMACION/app/files/081050145.pdf>
- Luján, A.; Pezet, F. y Becerra, L., 2006. *Capacidad de medición y calibración en el laboratorio de Patrones de referencia (división masa y densidad)* [En línea]. México: CENAM. [Consulta: 4 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://cenam.mx/memsimp06/Trabajos%20Aceptados%20para%20CD/Posters/P-18.pdf>
- Moroto, A.; Boque, R.; Riu, J. y Rius, X., s.d. *Cálculo de incertidumbre en medidas físicas: Medida de una masa*. Tarragona: Universitat Rovira i Virgili.
- Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), 2004a. *Conventional value of the result of weighing in air* [En línea]. Paris: OIML. [Consulta: 21 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.oiml.org/en/files/pdf_d/d028-e04.pdf
- Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), 2004b. *International Recommendation OIML R 111-1 Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃. Part 1: Metrological and technical requirements* [En línea]. Paris: OIML. [Consulta: 26 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r111-1-e04.pdf
- Rocío, M. y Pellecer, J., 2002. *Metrología para no metrólogos*. 2da. ed. Guatemala: SIM OEA. pp. 47-54.

Talavera, M. y Pezet, F., 2002. *Trazabilidad en las mediciones de masa* [En línea]. México: CENAM. [Consulta: 21 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.cenam.mx/memorias/descarga/simposio%202002/doctos/te077.pdf>