

T/S30/P23a

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA



**“MÉTODO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE
PESAS MEDIANTE EL USO DE CARGAS ADICIONALES”**

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO

EN FÍSICA

POR

JOSÉ LUIS PANTA ABAD

CALLAO – PERÚ

2013

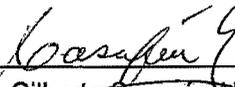
HOJA DE PRESENTACIÓN
MÉTODO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE PESAS
MEDIANTE EL USO DE CARGAS ADICIONALES
JOSÉ LUIS PANTA ABAD

Tesis presentada a consideración del Cuerpo de Docentes de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática de la Universidad Nacional del Callao, como parte de los requisitos para obtener el Título Profesional de Licenciado en Física.

Aprobada por:



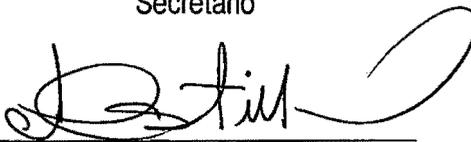
Mg. Roel Mario Vidal Guzmán
Presidente



Lic. Eladio Gilberto Casapia Almonte
Vocal



Lic. Rolando Manuel Vega De la Peña
Secretario



Lic. Absalón Castillo Valdivieso
Suplente

CALLAO – PERÚ

FICHA CATALOGRÁFICA

PANTA ABAD, JOSÉ LUIS

Método Alternativo para la Calibración de Pesas Mediante el Uso de Cargas Adicionales, Callao (2013).

xii, 109 páginas. (UNAC, Licenciado en Física, 2013)

Tesis, Universidad Nacional del Callao, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática.

Física.

DEDICATORIA

A mis padres, Pedro y Editha, a quienes les debo la vida y todo lo que soy.

A Liz, el amor de mi vida.

A mis hijos, aunque aún no existen, lo hago por ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A Dios ante todo, por haber permitido la realización de este trabajo y por el inagotable y sensible amor que me brinda cada día, Señor muchas gracias por regalarme el boleto para esta travesía llamada vida.

A mi padre, Pedro Panta Viera, el hombre para el que todo tiene solución, tú me has enseñado que uno nunca debe darse por vencido, gracias por todas tus historias que de verdad me han ayudado en lo que llevo de vida, por estar siempre cuando te he necesitado, y cuando no también, te amo padre.

A mi madre, Editha Mercedes Abad Urbina, porque más que un plato caliente me has dado el calor de tu amor, porque siempre estás para todo lo que necesito, porque eres apoyo y consejo, por todos esos pequeños detalles que haces por mí, por impulsarme siempre, por alentarme y sobre todo por soportarme, te amo madre.

A mis hermanos, Sergio, porque tú me animas a caminar siempre más rápido para alcanzarte; Vanessa, porque tu alegría siempre puede dibujarme una sonrisa; Sheyla, por ser mi compañera de locuras. Gracias por ser mis mejores amigos y formar parte de esta hermosa sociedad que es nuestra familia, por escucharme y creer en mí.

A Liz, el amor de mi vida, por todo tu apoyo y tu confianza, porque eres mi roca y sé que en ti siempre podré apoyarme, porque eres lo que me faltaba en la vida y por ser mi “primera asesora”. Me faltará vida para seguir amándote.

A mi asesor, Lic. Gustavo Altamiza Chávez, por su apoyo y sus consejos.

Al profesor Dr. Walter Flores Vega, por todo el apoyo y consejos que he recibido de su parte, por ser un modelo de profesional y uno de los profesores que más aprecio.

A Ricardo Sotomayor, gerente del laboratorio de calibración de Total Weight & Systems S.A.C., por facilitarme las instalaciones y los equipos utilizados para este trabajo, por todos los permisos concedidos y por el soporte técnico. Más que un jefe eres un gran amigo, cuenta siempre conmigo.

RESUMEN

MÉTODO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE PESAS MEDIANTE EL USO DE CARGAS ADICIONALES

JOSÉ LUIS PANTA ABAD

OCTUBRE - 2013

Asesor: Lic. Gustavo Altamiza Chávez

Título obtenido: Licenciado en Física

El presente trabajo muestra un método alternativo para la calibración de pesas, se presentan los modelos físico y matemático de la medición del valor de masa convencional para luego realizar la calibración de una pesa de 1 kg de clase F2. El método presentado propone la inclusión de cargas adicionales con la intención de mejorar la aproximación de lectura de una balanza y poder usarla para la calibración de una pesa. Finalmente se realiza la comparación de los resultados obtenidos usando el método presentado con los resultados obtenidos haciendo uso de un método convencional de calibración.

PALABRAS CLAVE:

Metrología.

Masa.

Calibración.

Pesas patrones.

Incertidumbre de medición.

ABSTRACT

**ALTERNATIVE METHOD FOR WEIGHT CALIBRATION USING
ADDITIONAL WEIGHTS**

JOSE LUIS PANTA ABAD

NOVEMBER - 2013

Adviser: Lic. Gustavo Altamiza Chavez

Degree: Graduate in Physics

This paper shows an alternative method for the calibration of weights, it present the physical and mathematical models of conventional mass measurement, then it performs the calibration of a 1 kg weight of F2 class. This method proposes the inclusion of additional weights with the intention of improving the approach of the balance reading and use it to calibrate a weight. Finally, a comparison of the results obtained using the method presented with the results obtained using a conventional method of calibration is made.

KEYWORDS:

Metrology.

Mass.

Calibration.

Standard weights.

Measurement uncertainty.

ÍNDICE

HOJA DE PRESENTACIÓN Y APROBACIÓN	ii
FICHA CATALOGRÁFICA	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE	ix

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1.1. Descripción y Análisis del Tema	1
1.1.2. Problema	5
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.2.1. Objetivos	5
1.2.2. Alcance	6
1.3. IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.4. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS	7
1.4.1. Hipótesis	7
1.4.2. Variables	8

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	9
2.1. TERMINOLOGÍA UTILIZADA	9
2.2. ANTECEDENTES TÉCNICOS Y DATOS VINCULADOS A LA INVESTIGACIÓN CON LA PRECISIÓN DE LA FUENTE BIBLIOGRÁFICA	16
2.3. REFERENTES TEÓRICOS	18
2.3.1. Masa	18
2.3.2. Masa Convencional	20
2.3.3. Ley de Gravitación de Newton	23
2.3.4. Principio de Arquímedes	25
2.3.5. Equilibrio y Reposo	28
2.3.6. Cálculo de Incertidumbre	30
2.3.6.1. Evaluación Tipo A de la Incertidumbre Estándar	33
2.3.6.2. Evaluación Tipo B de la Incertidumbre Estándar	35
2.3.6.3. Ley de Propagación de la Incertidumbre	37
2.3.6.4. Incertidumbre Expandida	38
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS	41
3.1. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	41
3.1.1. Patrón de Referencia	41

3.1.2. Balanza	45
3.1.3. Instrumentos de Medición de Condiciones Ambientales	45
3.2. SECUENCIA DE MEDICIÓN	47
3.3. DETERMINACIÓN DE LA MASA	51
3.4. CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE	56
3.4.1. Incertidumbre del Proceso de Pesaje	57
3.4.2. Incertidumbre de la Pesa de Referencia	57
3.4.3. Incertidumbre de la Corrección por Empuje del Aire	59
3.4.4. Incertidumbre de la Balanza	61
3.4.5. Incertidumbre Combinada del Valor de Masa Convencional	63
3.4.6. Incertidumbre Expandida del Valor de Masa Convencional	63
3.5. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS	64
3.5.1. Prueba para la Incertidumbre	64
3.5.2. Prueba para el Valor de Masa Convencional	65
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES	69
4.1. RESULTADOS	69
4.2. TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS	71
4.2.1. Valor de Masa Convencional	71
4.2.1. Incertidumbre de la Medición	71

4.2.1.1. Incertidumbre del Proceso de Pesaje	71
4.2.1.2. Incertidumbre de la Pesa de Referencia	72
4.2.1.3. Incertidumbre de la Corrección por Empuje del Aire	72
4.2.1.4. Incertidumbre de la Balanza	74
4.2.1.5. Incertidumbre Combinada del Valor de Masa Convencional	74
4.2.1.6. Incertidumbre Expandida del Valor de Masa Convencional	76
4.3. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS	77
4.3.1. Prueba para la Incertidumbre	81
4.3.2. Prueba para el Valor de Masa Convencional	82
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXOS	90
ANEXO 1: VOCABULARIO	90
ANEXO 2: FÓRMULA REVISADA PARA LA DENSIDAD DEL AIRE HÚMEDO (CIPM-2007)	105

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.1. Descripción y Análisis del Tema

Actualmente el Perú viene experimentando un crecimiento económico, lo cual es producto del crecimiento de las diferentes industrias, tales como la manufacturera, extractiva, alimentaria, etc., el cual unido a los recientes tratados internacionales, como el libre comercio, ha generado además un aumento en la exportaciones.

El comercio internacional exige a la industria peruana una serie de condiciones tanto para los productos exportados como para las empresas que los elaboran. Las características de los productos deben ser medidas para garantizar los estándares de calidad impuestos por las normativas internacionales, por lo que la industria peruana viene demandando cada vez más la calibración de sus instrumentos de medición.

Las estadísticas indican que entre un 60% y 80% de las fallas en una empresa están relacionadas con la ausencia de un óptimo sistema de aseguramiento metrológico, en otros términos, es poco probable conseguir buenos resultados en el proceso de fabricación de un producto, si los instrumentos de medición utilizados tales como balanzas, termómetros, reglas, pesas, entre otros, no ofrecen mediciones confiables [1].

En una encuesta realizada por el Consejo Nacional de la Competitividad [3] a ciertas empresas, 40% de estas afirmaron actualmente que los laboratorios de calibración y centros de ensayo no cubren sus necesidades, actualmente el Perú cuenta 13 laboratorios de calibración acreditados por el SNA/INDECOPI [2], de los cuales sólo 9 realizan calibraciones de pesas, patrones de medida indispensables para la verificación de las balanzas, instrumentos presentes en la mayoría de procesos industriales. Esta carencia de laboratorios de calibración de pesas se debe a los elevados costos que tienen las balanzas requeridas para la calibración de las mismas, cuyas exactitudes deben ser al menos 10 veces mejores que el error máximo permitido de la pesa a calibrar [4].

Es evidente entonces que en un futuro, la oferta de laboratorios de calibración no podrá satisfacer la creciente demanda de la industria nacional, por lo que muchas empresas optarán por no ensayar o certificar

sus productos y otras por acudir a empresas de ensayo y calibración en otros países, esto podría generar el aumento de los costos de producción y que la calidad de los productos se vea afectada, además, según el Consejo Nacional de la Competitividad, la diversas actividades productivas dejarán de crecer en un 2% [3].

Para poder controlar esta situación es necesario ampliar la cantidad de laboratorios de calibración de pesas, lo cual podría hacerse o bien reduciendo los costos de los equipos necesarios para las calibraciones, o utilizando métodos alternativos que nos permitan obtener las exactitudes requeridas por las normas sin la necesidad de hacerlo con equipos costosos.

Por otro lado, debido a que el valor de resolución es una característica de operación de la balanza utilizada, existe una limitación en el valor de la masa de la pesa que queremos encontrar, ya que existe una zona donde el observador no conoce con exactitud dónde se localiza el valor medido. Si la resolución de la balanza es "d", el valor de masa que produce una indicación "I" puede localizarse con igual probabilidad en cualquier lugar del intervalo de $[I - d/2; I + d/2]$ [7]. Según Becerra [6], una de las alternativas para superar esta limitación puede ser añadir sucesivamente pequeñas cargas de prueba con valor nominal equivalente

a $dT = d/5$ o $d/10$ para determinar con mayor exactitud la carga para la cual la indicación cambia sin ambigüedades.

Por ejemplo, para el caso de una balanza con resolución $d = 10$ mg, en la que sólo se pueden calibrar pesas de errores máximos permitidos 100 mg o mayores, al añadir sucesivamente cargas desde 1 mg hasta 9 mg, los valores de masa reportados por ésta pueden conocerse con una exactitud diez veces mejor, permitiendo que esta balanza pueda ser utilizada para realizar calibraciones de pesas cuyos errores máximos permitidos sea de 10 mg o mayores, sin incumplir ningún requisito normativo [4].

Sin embargo, dado que toda medición depende de diversas variables (observador, equipos, condiciones ambientales, método, etc.), es fundamental determinar si existe alguna variación significativa en los parámetros de calibración de una pesa (masa convencional e incertidumbre) si ésta se realiza utilizando un método alternativo, mediante el uso de cargas adicionales, diferente al método tradicional propuesto en la recomendación internacional OIML R 111-1 [5].

1.1.2. Problema

¿Es posible el uso de un método alternativo para la calibración de pesas?

1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Objetivos

- Diseñar un método de calibración de pesas que permita el uso de balanzas que tengan una resolución igual o menor al error máximo permitido de una pesa.
- Obtener los valores de masa convencional e incertidumbre de calibración para una pesa de valor nominal 1 kg de clase de exactitud F2 utilizando una balanza de resolución 1 mg mediante el uso del método tradicional de calibración de pesas propuesto en la recomendación internacional OIML R 111-1[5].
- Obtener los valores de masa convencional e incertidumbre de calibración para una pesa de valor nominal 1 kg de clase de exactitud F2 utilizando una balanza de resolución 10 mg mediante

el uso del método alternativo de calibración de pesas mediante el uso de cargas adicionales.

1.2.2. Alcance

El presente estudio se trata de una investigación aplicada, debido a que se busca resolver un problema práctico que aqueja a los laboratorios de calibración en el Perú, con cuyos resultados se contribuirá al desarrollo de la metrología industrial en el Perú, beneficiando así mismo al sector industrial, ya que los costos de las calibraciones de pesas se reducirán permitiendo una mejora en la calidad de los productos. Sin embargo, debido a que a la fecha no se han diseñado pesas de valor nominal menor a 1 mg, no será posible aplicar los resultados a balanzas con resoluciones menores a 10 mg.

1.3. IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La importancia del presente estudio radica en que, el uso de cargas adicionales durante la calibración de pesas permitirá obtener indicaciones con una exactitud hasta 10 veces más alta, lo que posibilitará la utilización de balanzas con resoluciones “gruesas”, las cuales antes actualmente no pueden ser utilizadas pues no permiten obtener las exactitudes requeridas por el método tradicional de calibración de pesas, reduciendo así los

costos de las calibraciones de pesas y generando además un beneficio económico para los laboratorios de calibración que realicen calibración de pesas con este nuevo método; asimismo, la reducción de los costos para la implementación de un laboratorio de calibración de pesas permitirá solucionar eventualmente la escasez de los mismos, con lo que se podrá satisfacer la demanda de calibraciones de pesas, mejorando la calidad de las mediciones en la industria y la calidad de sus productos, lo cual además forma parte de la “Agenda de Competitividad 2012-2013”, planteada por el Consejo Nacional de la Competitividad para la mejora de calidad en el Perú.

Por otra parte, los resultados del presente estudio serán una contribución al desarrollo de la metrología en el Perú y podrán ser generalizados para ser aplicados a balanzas de resoluciones distintas a las estudiadas en este trabajo y equipos de mediciones cuyos principios de funcionamiento sean similares.

1.4. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis

El método alternativo permite la calibración de pesas para una balanza con resolución de 10 mg.

1.4.2. Variables

- Variables Dependientes: Parámetros de calibración (masa convencional e incertidumbre).
- Variable Independiente: Método de medición.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. TERMINOLOGÍA UTILIZADA

Los siguientes términos son presentados con el objetivo lograr un mejor entendimiento del presente trabajo de investigación, todos los términos han sido extraídos del “Vocabulario Internacional de Metrología – Conceptos Fundamentales y Generales, y Términos Asociados (VIM)” [8], versión traducida por el Servicio Nacional de Metrología - INDECOPI, para otros términos relevantes consultar el anexo.

Medición

Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud.

NOTA 1 Las mediciones no son de aplicación a las propiedades cualitativas.

NOTA 2 La medición supone una comparación de magnitudes, e incluye el conteo de entidades.

NOTA 3 Una medición supone una descripción de la magnitud compatible con el uso previsto de un resultado de medición, un procedimiento de medición y un sistema de medición calibrado operando conforme a un procedimiento de medición especificado, incluyendo las condiciones de medición.

Metrología

Ciencia de las mediciones y sus aplicaciones.

NOTA La metrología incluye todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones, cualesquiera que sean su incertidumbre de medición y su campo de aplicación.

Mensurando

Magnitud que se desea medir.

NOTA 1 La especificación de un mensurando requiere el conocimiento de la naturaleza de la magnitud y la descripción del estado del fenómeno, cuerpo o sustancia que tiene a dicha magnitud como una propiedad, incluyendo las componentes relevantes y las entidades químicas involucradas.

NOTA 2 En la 2ª edición del VIM y en IEC60050-300:2001, el mensurando está definido como la “magnitud sujeta a medición”.

NOTA 3 La medición, incluyendo el sistema de medición y las condiciones bajo las cuales se realiza ésta, podría alterar el

fenómeno, cuerpo o sustancia, de tal forma que la magnitud que se está midiendo pueda diferir del mensurando tal como ha sido definido. En este caso sería necesario efectuar la corrección apropiada.

EJEMPLO 1 La diferencia de potencial entre los terminales de una batería puede disminuir cuando se utiliza un voltímetro con una conductancia interna significativa. La diferencia de potencial en circuito abierto puede calcularse a partir de las resistencias internas de la batería y del voltímetro.

EJEMPLO 2 La longitud de una varilla cilíndrica de acero en equilibrio con la temperatura ambiente de 23 °C será diferente de su longitud a la temperatura de 20 °C, para la cual se ha definido el mensurando. En este caso, es necesaria una corrección.

NOTA 4 En química, la “sustancia a analizar”, el analito, o el nombre de una sustancia o de un compuesto, se emplean algunas veces en lugar de “mensurando”. Esta práctica es errónea debido a que estos términos no se refieren a magnitudes.

Valor Convencional de una Magnitud

Valor asignado a una magnitud, mediante un acuerdo, para un determinado propósito.

EJEMPLO 1 Valor convencional de la aceleración de caída libre (antes llamada “aceleración normal debida a la gravedad”, $g_n = 9,806\ 65\ \text{m s}^{-2}$.

EJEMPLO 2 Valor convencional de la constante de Josephson, $K_{J-90} = 483597,9\ \text{GHz V}^{-1}$

EJEMPLO 3 Valor convencional de un patrón de masa dado, $m = 100,003\ 47\ \text{g}$.

NOTA 1 Habitualmente se utiliza para este concepto el término “valor convencionalmente verdadero”, aunque no se aconseja su uso.

NOTA 2 Algunas veces, un valor convencionales un estimado de un valor verdadero.

NOTA 3 El valor convencional se considera generalmente asociado a una incertidumbre de medición convenientemente pequeña, que podría ser nula.

Incertidumbre de Medición

Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.

NOTA 1 La incertidumbre de medición incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así

como la incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre.

NOTA 2 El parámetro puede ser, por ejemplo, una desviación estándar, en cuyo caso se denomina incertidumbre estándar de medición (o un múltiplo de ella), o el semiancho de un intervalo con una probabilidad de cobertura determinada.

NOTA 3 En general, la incertidumbre de medición incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medición, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones estándar. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medición, pueden caracterizarse también por desviaciones estándar, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.

NOTA 4 En general, para una información dada, se sobrentiende que la incertidumbre de medición está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando. Por tanto, una modificación de este valor supone una modificación de la incertidumbre asociada.

Calibración

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

NOTA 1 Una calibración puede expresarse mediante una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos, puede consistir en una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su incertidumbre correspondiente.

NOTA 2 Conviene no confundir la calibración con el ajuste de un sistema de medición, a menudo llamado incorrectamente "auto calibración", ni con una verificación de la calibración.

NOTA 3 Frecuentemente se interpreta que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración.

Error de Medición

Valor medido de una magnitud menos un valor de referencia.

NOTA 1 El concepto de error de medición puede emplearse:

a) Cuando exista un único valor de referencia, como en el caso de realizar una calibración mediante un patrón cuyo valor medido tenga una incertidumbre de medición despreciable, o cuando se toma un valor convencional, en cuyo caso el error de medición es conocido.

b) Cuando el mensurando se supone representado por un valor verdadero único o por un conjunto de valores verdaderos, de amplitud despreciable, en cuyo caso el error de medición es desconocido.

NOTA 2 Conviene no confundir el error de medición con un error en la producción o con un error humano.

Error Máximo Permitido

Valor extremo del error de medición, con respecto a un valor de referencia conocido, permitido por especificaciones o reglamentaciones, para una medición, instrumento o sistema de medición dado.

NOTA 1 En general, los términos “errores máximos permitidos” o “límites de error” se utilizan cuando existen dos valores extremos.

NOTA 2 No es conveniente utilizar el término «tolerancia» para designar el “error máximo permitido”.

2.2. ANTECEDENTES TÉCNICOS Y DATOS VINCULADOS A LA INVESTIGACIÓN CON LA PRECISIÓN DE LA FUENTE BIBLIOGRÁFICA

Dentro de los resultados de los trabajos de investigación más relevantes, realizados anteriormente a nivel internacional, sobre el problema planteado pueden mencionarse los siguientes:

El Centro Español de Metrología; Procedimiento ME-007 y ME-015 en la Calibración de Masas: Determinación del Valor Convencional de Masa [9]; logró implementar un procedimiento para la calibración de pesas de 1 mg hasta 5 000 kg en un instrumento de pesaje mediante la aplicación del método de sustitución y el empleo de una o varias masas patrón que sumen el mismo valor nominal que la masa a calibrar.

Becerra L. y Nava J.; Incertidumbre en la Calibración de Pesas por el Método ABBA [10]; desarrollaron una guía para el cálculo de la incertidumbre en la calibración de pesas mediante el uso del método ABBA, el cual afirman es el más utilizado para obtener la diferencia de masa entre la pesa patrón y la pesa desconocida en la calibración. Debido a la secuencia de calibración de este método, se disminuye el efecto de la deriva a corto plazo que se presenta en los instrumentos para pesar

además de introducir la corrección por la sensibilidad del instrumento para pesar en el momento de la calibración.

Kornblit, F. y col.; Comparación de Criterios para la Estimación del Factor de Sensibilidad en la Calibración de Masas por Comparación [11]; para evaluar la sensibilidad, adicionaron una pesa de valor de masa conocido, y corrigieron el resultado por un factor estimado de acuerdo a un diseño de cálculo preestablecido. Su objetivo fue comparar diseños alternativos, todos ellos asociados al modelo general ABBA, y derivar criterios para la selección de las pesas de sensibilidad, que minimicen o reduzcan convenientemente las incertidumbres.

Becerra L. y col; Guía Técnica de Trazabilidad e Incertidumbre en la Magnitud de Masa (Calibración de Instrumentos para Pesar de Funcionamiento No Automático) [6]; afirman que a discreción del laboratorio de calibración y con la aprobación del cliente se pueden aplicar métodos alternativos para obtener las indicaciones con una mejor resolución que "d", por ejemplo cuando se comprueba el cumplimiento de una especificación y se requiere una menor incertidumbre. Una de las alternativas puede ser añadir sucesivamente pequeñas cargas de prueba con valor nominal equivalente a $d_T = d/5$ o $d/10$ para determinar con mayor exactitud la carga para la cual la indicación cambia sin ambigüedades.

Se han realizado diferentes trabajos de investigación para realizar la calibración de pesas en varios laboratorios de calibración e institutos nacionales de metrología utilizando diversos métodos de medición, pero a la fecha de realización de este trabajo no se ha encontrado ninguno que utilice cargas adicionales para obtener indicaciones con mayor exactitud en la calibración de pesas. En este caso, este trabajo se implementó en el laboratorio de calibración de la empresa Total Weight & Systems S.A.C. para lo cual se trabajó con un nuevo método de medición, el cual incluye la adición de cargas para poder reducir la incertidumbre por aproximación de lectura. La implementación de este trabajo no fue muy costosa y está al alcance de cualquier laboratorio de calibración que desee implementar este método de calibración pues se puede utilizar con cualquier balanza que tenga una resolución mayor o igual a 10 mg.

2.3. REFERENTES TEÓRICOS

2.3.1. Masa

No todos los objetos experimentan la misma aceleración cuando sobre ellos actúan fuerzas similares. Un auto normal, por ejemplo, podría ser capaz de proporcionar una aceleración significativa a un remolque vacío pequeño pero considerablemente menor cuando el remolque está

lleno. Si un camión está cargado, el tiempo y la distancia requerida para una parada segura aumenta significativamente.

La propiedad de los objetos que determina cuánto aceleran en respuesta a una fuerza aplicada se denomina masa. Si la masa es grande, la aceleración será menor que si la masa fuera más pequeña. Cuanto menor sea la masa, mayor será la aceleración [12].

La masa no depende de la ubicación. Una fuerza particular causa la misma cantidad de aceleración sin importar donde se encuentre el objeto: cerca de la tierra, en el espacio interestelar, o en cualquier otro lugar. Si el mismo objeto experimenta aceleraciones diferentes en distintos lugares, es porque las fuerzas que actúan sobre él son diferentes, no porque su masa haya cambiado.

Para ser útil, el concepto de masa debe hacerse cuantitativo. Queremos saber, por ejemplo, si un saco de papas tiene una masa de un kilogramo o dos kilogramos. La cantidad de masa se define por comparación con algún patrón definido arbitrariamente. El kilogramo se define, según la traducción autorizada del CEM, de la siguiente forma:

“El kilogramo es la unidad de masa; es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo.” [13]

El prototipo, que es una pieza compuesta de 90% de Platino y 10% de Iridio, se mantiene bajo estricta vigilancia en el Buró Internacional de Pesas y Medidas en Sevres, Francia.

Para que el proceso de medición sea práctico, copias del kilogramo patrón son suministradas a los institutos de metrología de los distintos países. Ellos, a su vez, hacen copias (algunas de los cuales están divididas en mitades, cuartos, etc.). Una manera de comparar la masa de las papas con la masa patrón es colocar las papas y la masa patrón en lados opuestos de una balanza y dejar que la gravedad sirva como una fuerza de referencia. Se ponen las papas en un lado y se añaden pesas patrones al otro lado hasta llegar al equilibrio. Ahora se suman las pesas patrones usadas y esto es igual a la masa de las papas. Se ha hecho entonces una comparación (indirectamente) con el patrón de kilogramo, ubicado en Sevres.

2.3.2. Masa Convencional

La masa de un objeto se obtiene pesándolo en el aire. Debido a que el instrumento de pesaje indica un valor que es proporcional a la fuerza gravedad sobre el objeto menos el empuje del aire, la indicación del instrumento, en general, tiene que ser corregida para compensar el

efecto de empuje. El valor de esta corrección depende de la densidad del objeto y la densidad del aire.

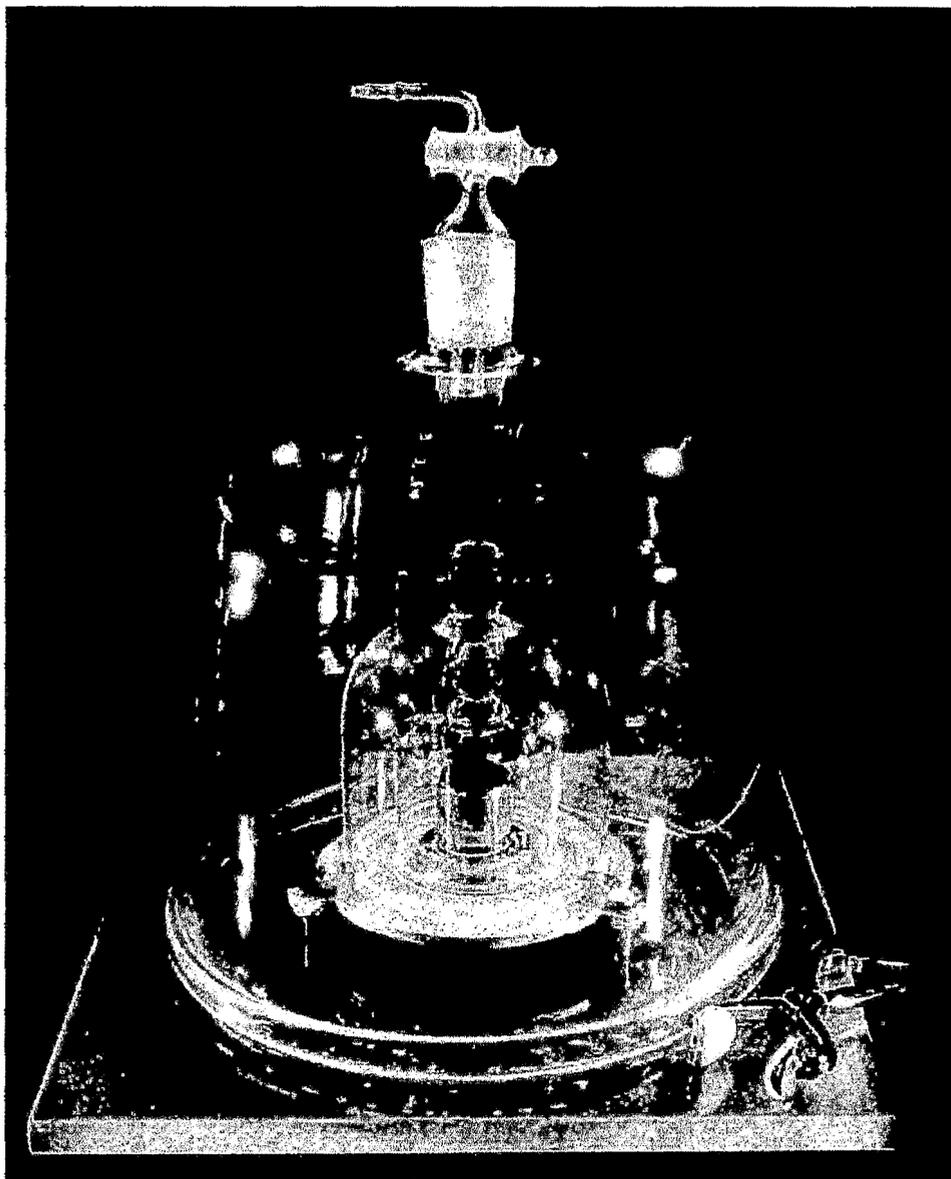


Figura 2.1: El prototipo internacional del kilogramo fue establecido en 1889. Su forma es un cilindro con un diámetro y altura de aproximadamente 39 mm.

Fuente: [www.bipm.org, recuperado el 2013-05-07]

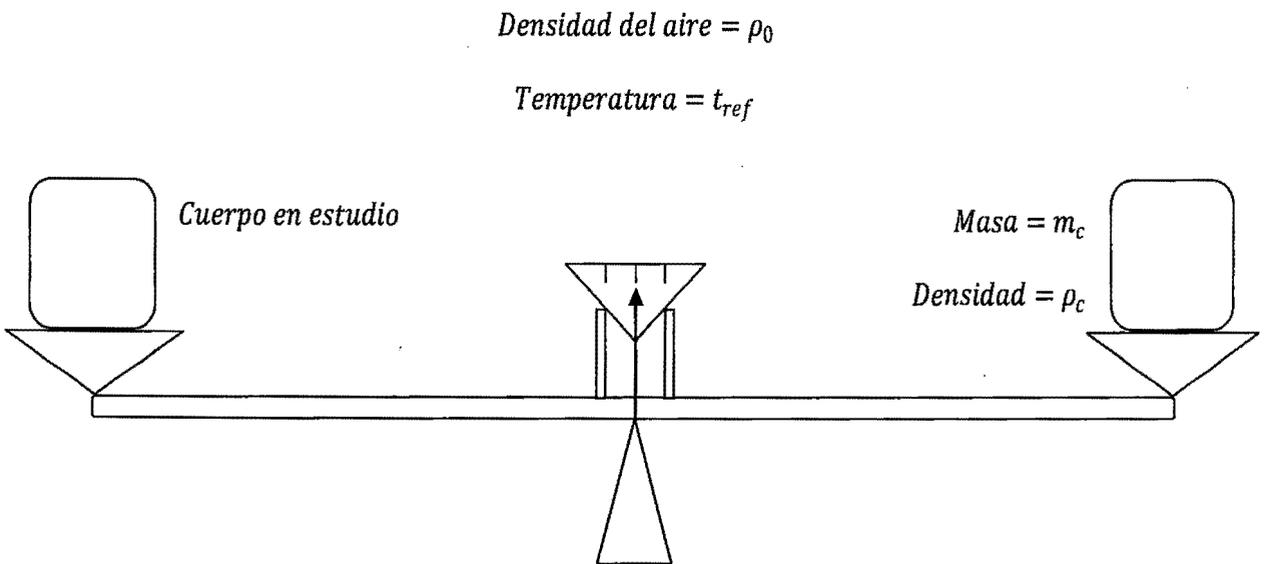


Figura 2.2: Valor de masa convencional m de un cuerpo es la masa convencional m_c de una pesa de referencia de densidad $\rho_c = 8\,000\text{ kg m}^{-3}$ que mantiene en equilibrio a dicho cuerpo a una temperatura de referencia de $t_{ref} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ y una densidad de aire de referencia de $\rho_0 = 1,2\text{ kg m}^{-3}$.

Por conveniencia, se ha desarrollado lo que permite simplificar la determinación de la masa en metrología. Una masa convencional, m_c , se define de tal manera que, en condiciones especificadas, esta corrección por empuje del aire no será necesaria. Las condiciones han sido elegidos de tal manera que la masa y la masa de un peso no difieren en más de los valores máximos especificados OIML R 111 [5].

La masa convencional (figura (2.2)), también llamada valor convencional de masa, de acuerdo con la OIML D28 [14] se define como:

“El valor convencional de masa de un cuerpo es igual a la masa m_c de una pesa de referencia de densidad $\rho_c = 8\,000\text{ kg m}^{-3}$ que sostiene en equilibrio a dicho cuerpo, a una temperatura de referencia de $t_{ref} = 20\text{ °C}$ y una densidad aire de referencia de $\rho_0 = 1,2\text{ kg m}^{-3}$ ”.

2.3.3. Ley de Gravitación de Newton

Después de su suposición de las leyes del movimiento, la segunda contribución de Newton, y quizás la más grande al desarrollo de la mecánica, fue el descubrimiento de la ley de interacción gravitacional; esto es, la interacción entre dos cuerpos, ya sea planetas o partículas pequeñas, que produce un movimiento que puede ser descrito por las leyes de Kepler.

La ley de gravitación universal de Newton se puede establecer como:

“La interacción gravitacional entre dos cuerpos puede expresarse por una fuerza de atracción central proporcional a las masas de los

cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.” [15]

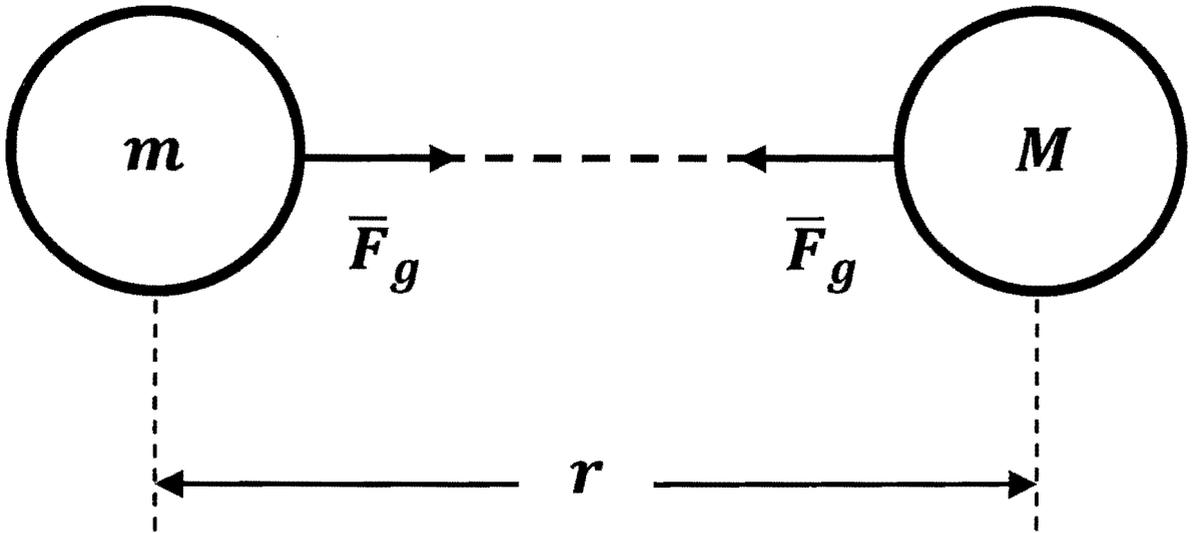


Figura 2.3: Interacción gravitacional entre dos masas.

Algebraicamente, para dos masas m y M , mostradas en la figura (2.3) separadas una distancia r , la fuerza F_g es:

$$F_g = \gamma \frac{mM}{r^2} \quad (2.1)$$

Dónde:

- γ es la constante de proporcionalidad y depende de las unidades utilizadas para las otras cantidades.

Para el caso de la tierra, con una masa M y un radio r , se define la aceleración de la gravedad local g_{local} como:

$$g_{local} = \gamma \frac{M}{r^2} \quad (2.2)$$

Dónde:

- g_{local} depende de la posición geográfica.

Así, la fuerza de gravedad ejercida por la tierra sobre un cuerpo cualquier está dada por:

$$F_g = mg_{local} \quad (2.3)$$

2.3.4. Principio de Arquímedes

La mayoría de nosotros hemos notado que los objetos inmersos en un fluido, como el agua, parecen pesar menos que fuera del fluido. Sin embargo, de nuestro estudio de la interacción gravitatoria que sabemos que ninguno de los factores que afectan el peso (masa y distancia) han cambiado. Así, los objetos realmente pesan lo mismo cuando están sumergidos en un fluido. Sin embargo, sin duda son más fáciles de levantar cuando están sumergidos.

Esta situación se ilustra en la figura (2.4), donde un fluido empuja a un objeto sumergido desde todos los lados. La presión en el fluido aumenta con la profundidad, por lo que las fuerzas de contacto hacia arriba sobre la parte inferior del objeto son mayores que las de contacto hacia abajo en la parte superior. El resultado total es una fuerza neta hacia arriba, llamada fuerza de empuje. La fuerza de empuje es el resultado de todas las fuerzas entre el objeto sumergido y el fluido circundante. Sin embargo, es más fácil pensar en el empuje como una única fuerza, en lugar de un gran número de pequeñas fuerzas que actúan en diferentes direcciones como se muestra en la figura (2.4).

Con un poco de esfuerzo podemos distinguir la fuerza de la fuerza de empuje en cualquier situación. Imaginemos que el espacio ocupado por el objeto sumergido en la figura (2.4) está lleno de aire en su lugar. Los mismos argumentos que hemos utilizado no nos llevan a la conclusión de que aquí el aire adyacente a la muestra en la figura (2.4) ejerce una fuerza sobre él que sólo equilibra su peso. Ahora, de la figura (2.4), supongamos que el objeto sumergido llena exactamente el espacio anteriormente ocupado por la muestra de aire. El aire que rodea ejerce una fuerza neta hacia arriba en el objeto de igualar la fuerza previamente ejercida sobre la muestra de fluido. Esta fuerza es igual al peso del aire que desplaza el objeto, ésta es la fuerza de empuje. La ley que rige la

intensidad de la fuerza de empuje que se conoce como el Principio de Arquímedes:

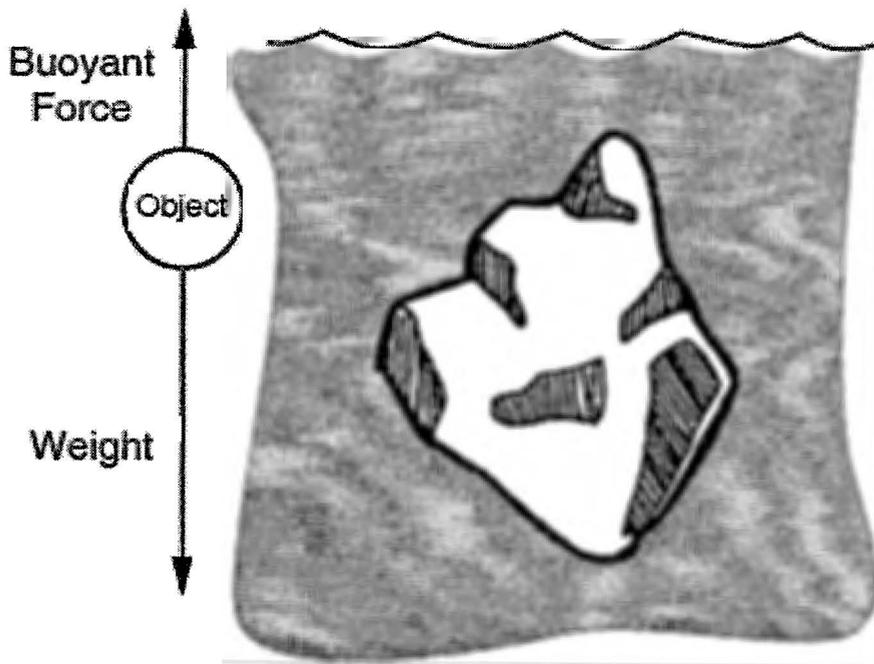


Figura 2.4: La presión del fluido causa una fuerza de empuje neta hacia arriba sobre el objeto.

Fuente: Mason G. y col., Physical Science Concepts

“Un objeto sumergido en un fluido experimenta una fuerza de empuje ascendente debido al contacto con las interacciones con el fluido circundante, cuya intensidad es igual al peso del líquido desplazado.” [12]

Así, cuando un objeto se encuentra totalmente sumergido en el aire, la intensidad de la fuerza de empuje está dada por [16]:

$$F_b = \rho_{aire} \times g \times V_{objeto} \quad (2.4)$$

2.3.5. Equilibrio y Reposo

Un cuerpo se encuentra en reposo con relación a un observador inercial cuando su velocidad, medida por este observador, es cero. Un cuerpo se encuentra en equilibrio con respecto a un observador inercial cuando su aceleración es cero ($a = 0$), o si, la masa es constante, cuando fuerza es cero ($F = 0$); esto es, un cuerpo se encuentra en equilibrio cuando la resultante de todas las fuerzas actuantes es cero.

Un cuerpo puede estar en reposo en relación con un observador inercial, pero no estar en equilibrio. Por ejemplo, cuando tiramos una piedra verticalmente hacia arriba, la piedra está momentáneamente en reposo cuando alcanza su altura máxima. Sin embargo, no se encuentra en equilibrio ya que está sometida a la fuerza de atracción no balanceada sobre la tierra. Por dicha razón la piedra comenzará inmediatamente a caer.

Igualmente, un cuerpo puede estar en equilibrio y no estar en reposo relativo a un observador inercial. Un ejemplo lo constituye una partícula libre. Como no actúan fuerzas sobre ella no hay aceleración y la partícula se encuentra en equilibrio. Sin embargo, la partícula puede no

estar en reposo con respecto a muchos observadores inerciales. La situación más común que se encuentra es aquella de un cuerpo que está tanto en reposo como en equilibrio al mismo tiempo. Por dicha razón muchas personas consideran erróneamente los dos conceptos como sinónimos. Por supuesto un cuerpo en equilibrio puede estar siempre en reposo en algún sistema inercial de referencia.

Cuando las fuerzas están actuando sobre un cuerpo rígido, es necesario considerar el equilibrio en relación tanto a la traslación como a la rotación. Por lo tanto se requieren las siguientes condiciones [15]:

La suma de todas las fuerzas debe ser cero (equilibrio de traslación):

$$\sum_i F_i = 0 \quad (2.5)$$

La suma de todos los torques con respecto a cualquier punto debe ser cero (equilibrio de rotación):

$$\sum_i \tau_i = 0 \quad (2.6)$$

Si las fuerzas se encuentran todas en un mismo plano, estas condiciones se reducen a las tres ecuaciones algebraicas siguientes:

$$\sum_i F_{ix} = 0, \sum_i F_{iy} = 0, \sum_i \tau_i = 0 \quad (2.7)$$

2.3.6. Cálculo de Incertidumbre

De acuerdo con el *"Evaluation of Measurement data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement"* [7], cuando se reporta el resultado de una medición de una magnitud física, es obligatorio que una indicación cuantitativa de la calidad de los resultados sea dada a fin de que aquellos que lo utilizan puedan evaluar su fiabilidad. Sin tal indicación, los resultados de medición no se pueden comparar, ya sea entre sí o con valores de referencia dados en una especificación o estándar. Por lo tanto, es necesario que exista un procedimiento fácilmente implementado, de fácil comprensión, y generalmente aceptado para la caracterización de la calidad de un resultado de una medición, es decir, para evaluar y expresar su incertidumbre.

El concepto de incertidumbre como un atributo cuantificable es relativamente nuevo en la historia de la medición, a pesar de errores y análisis de errores han sido durante mucho tiempo una parte de la práctica de la ciencia de la medición o metrología. Ahora es ampliamente

reconocido que, cuando todos los componentes conocidos de error (o de los que se sospecha) se han evaluado y se han aplicado las correcciones apropiadas, todavía queda una incertidumbre acerca de la exactitud del resultado mencionado, es decir, una duda sobre lo bien que el resultado de la medición representa el valor de la cantidad que se mide.

En la mayoría de los casos, el mensurando Y no es medido directamente, sino que es determinado a partir de N otras cantidades $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ a través de una relación funcional f :

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (2.8)$$

Las cantidades de entrada $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ de las cuales el mensurando Y depende, también pueden ser vistas como valores de medida y pueden depender de otras cantidades, incluidas las correcciones y factores de corrección de efectos sistemáticos, lo que conduce a una relación funcional f complicada que nunca podrá ser escrita explícitamente.

El conjunto de cantidades $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ se puede categorizar como:

Cantidades cuyos valores e incertidumbres son directamente determinadas durante la medición. Estos valores e incertidumbres pueden ser obtenidos de, por ejemplo, una observación simple, repetidas observaciones, o juicios basados en la experiencia, y pueden involucrar la determinación de correcciones a las lecturas de los instrumentos y correcciones por las magnitudes de influencia, tales como la temperatura ambiente, presión barométrica y la humedad.

Cantidades cuyos valores e incertidumbres son traídos a la medición desde fuentes externas, tales como cantidades asociadas con patrones de medición calibrados, certificados de materiales de referencia, y datos de referencia obtenidos de manuales.

Un estimado del mensurando Y , denotado por y , es obtenido por la ecuación (2.8) usando los estimados $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ para los valores de las N cantidades $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$. Así, el estimado y , el cual es el resultado de la medición, está dado por:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (2.9)$$

Cada estimado de entrada x_i y su incertidumbre estándar asociada $u(x_i)$ son obtenidos de una distribución de posibles valores de la cantidad de entrada X_i . Esta distribución de probabilidad puede estar basada en

frecuencias, esto es, basada en una serie de observaciones $X_{i,k}$ de X_i , o puede ser una distribución a priori. Las evaluaciones Tipo A de las componentes de la incertidumbre estándar se fundamentan sobre distribuciones frecuenciales, mientras que las evaluaciones Tipo B se fundamentan sobre distribuciones a priori. Se debe reconocer que en ambos casos las distribuciones son modelos que son usados para representar el estado de nuestro conocimiento.

2.3.6.1. Evaluación Tipo A de la Incertidumbre Estándar

En la mayoría de los casos, el mejor estimado disponible del valor estimado del valor μ_q de una cantidad q que varía aleatoriamente, y para el cual n observaciones independientes q_k han sido obtenidas bajo las mismas condiciones de medición, es el promedio aritmético \bar{q} de n observaciones:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (2.10)$$

Las observaciones individuales q_k difieren en valor debido a las variaciones aleatorias de las magnitudes de influencia, o a efectos aleatorios. La varianza experimental de las observaciones, la cual estima la varianza σ^2 de la distribución de probabilidad de q , está dada por:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (2.11)$$

El mejor estimado de $\sigma^2(\bar{q})$ es σ^2/n , la varianza de la media, está dado por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (2.12)$$

La varianza experimental de la media $s^2(\bar{q})$ y la desviación estándar experimental de la media $s(\bar{q})$, que es igual a la raíz cuadrada positiva de $s^2(\bar{q})$, cuantifica que tan bien \bar{q} estima al valor esperado μ_q de q , y cualquiera de las dos puede ser usada como una medida de la incertidumbre de \bar{q} .

Para una medición bien caracterizada bajo control estadístico, una varianza agrupada s_p^2 (o una desviación estándar experimental combinada s_p) que caracteriza a la medición puede estar disponible. En tales casos, cuando el valor de un mesurando q se determina a partir de n observaciones independientes, la varianza experimental de la media aritmética \bar{q} de las observaciones se estima mejor por s_p^2/n que por $s^2(q_k)/n$ y la incertidumbre estándar es $u = s_p/\sqrt{n}$.

2.3.6.2. Evaluación Tipo B de la Incertidumbre Estándar

Para obtener una estimación x_i de una cantidad de entrada X_i que no se ha obtenido a partir de observaciones repetidas, la varianza estimada asociada $u^2(x_i)$ o la incertidumbre estándar $u(x_i)$ se evalúa por el juicio científico basado en toda la información disponible en la variabilidad posible de X_i . El conjunto de información puede incluir:

- Datos de medición anteriores.
- Experiencia o conocimiento general del comportamiento y las propiedades de los materiales e instrumentos pertinentes.
- Las especificaciones del fabricante.
- Los datos proporcionados en la calibración y otros certificados.
- Incertidumbres asignadas a los datos de referencia obtenidos de manuales.

El uso adecuado del grupo de información disponible para una evaluación Tipo B de la incertidumbre estándar requiere una visión basada en la experiencia y el conocimiento en general, y es una habilidad que se puede aprender con la práctica. Se debe reconocer que una evaluación Tipo B de la incertidumbre estándar puede ser tan fiable como

una evaluación Tipo A, especialmente en una situación de medición en la cual una evaluación Tipo A se basa en un número relativamente pequeño de observaciones estadísticamente independientes.

Si la estimación x_i se toma de las especificaciones del fabricante, certificado de calibración, manual, o de otra fuente y se indica que su incertidumbre declarada es un múltiplo particular de una desviación estándar, entonces la incertidumbre típica $u(x_i)$ es simplemente el valor declarado dividido por el multiplicador, y la varianza estimada $u^2(x_i)$ es el cuadrado de ese cociente.

En algunos casos, puede ser posible estimar sólo límites (límites superior e inferior) para X_i , en particular, para indicar que "la probabilidad de que el valor de X_i se encuentre dentro del intervalo de a_- a a_+ para todos los propósitos prácticos es igual a uno y la probabilidad de que X_i se encuentre fuera de este intervalo es esencialmente cero". Si no hay conocimiento específico sobre los posibles valores de X_i dentro del intervalo, uno sólo puede suponer que es igualmente probable para X_i encontrarse en cualquier lugar dentro de él (una distribución uniforme o rectangular de valores posibles). Entonces x_i , el valor esperado o esperado de X_i , es el punto medio del intervalo, $x_i = (a_- + a_+)/2$, con varianza asociada:

$$u^2(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12} \quad (2.13)$$

2.3.6.3. Ley de Propagación de la Incertidumbre

La incertidumbre estándar de y , donde y es el estimado del mensurando Y y el resultado de la medición, es obtenido a partir de la combinación apropiada de las incertidumbres estándar de las cantidades de entrada $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$. Esta incertidumbre estándar combinada del estimado y es denotada por $u_c(y)$.

La incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ es la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada $u_c^2(y)$, la cual es dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2.14)$$

Donde f es la función dada en la ecuación (2.9). Cada $u^2(x_i)$ es una incertidumbre estándar obtenida mediante una evaluación de tipo A o de tipo B. La incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ es una desviación estándar estimada y caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando Y .

2.3.6.4. Incertidumbre Expandida

A pesar de que $u_c(y)$ puede ser universalmente usada para expresar la incertidumbre del resultado de una medición, en algunas aplicaciones comerciales, industriales y reglamentarias, y cuando la salud y la seguridad están en juego, frecuentemente es necesario brindar una medida de incertidumbre que defina un intervalo alrededor del resultado de la medición, el cual se espera que pueda incluir una fracción suficientemente grande de la distribución de valores que podrían razonablemente ser atribuidos al mensurando.

La medición adicional de incertidumbre que reúna los requisitos de proveer un intervalo del tipo indicado en el párrafo anterior es denominada incertidumbre expandida y es denotada por U . La incertidumbre expandida U se obtiene de multiplicar la incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ por un factor de cobertura k .

Entonces, el resultado de una medición es expresado convenientemente como $Y = y \pm U$, cuya interpretación es que y es el mejor estimado del valor atribuible a la medición de Y , y que $y - U$ e $y + U$ forman un intervalo del cual se puede esperar que incluya una fracción suficientemente grande de la distribución de valores que podrían

razonablemente ser atribuidos a Y . Tal intervalo también puede ser expresado como $y - U \leq Y \leq y + U$.

El valor de k puede determinarse de diversas formas, una forma es calcularlo a partir de la distribución t de Student, siguiendo los siguientes pasos:

1. Obtener y y $u_c(y)$ de acuerdo a lo descrito anteriormente.
2. Calcular los grados de libertad efectivos v_{eff} a partir de la fórmula de Welch – Satterthwaite (ecuación (2.15)).

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u^4(x_i)}{v_i}} \quad 2.15$$

Si $u(x_i)$ es obtenido a partir de una evaluación de tipo A, v_i es igual a la cantidad de mediciones independientes menos uno. Si $u(x_i)$ es obtenido a partir de una evaluación de tipo B, este puede ser tratado como si fuera conocido exactamente, lo cual en la práctica usualmente es el caso, entonces $v_i \rightarrow \infty$, en otros casos v_i puede estimarse a partir de:

$$v_i = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} \quad 2.16$$

3. Obtener el factor $t(v_{eff})$ para el nivel de confianza deseado de la tabla para la distribución t de Student.

4. Hacer $k = t(v_{eff})$ y calcular $U = t(v_{eff}) \times u_c^2(y)$.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se detallan los materiales y métodos que se utilizaron para realizar el presente trabajo de investigación.

3.1. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

3.1.1. Patrón de Referencia

Con el fin de asegurar la trazabilidad de las mediciones al Sistema Internacional de Unidades, se mandó a calibrar el patrón de referencia al Servicio Nacional de Metrología previamente a las pruebas realizadas. El patrón de referencia utilizado tiene un historial de calibraciones, de donde se puede obtener su deriva instrumental. Los valores obtenidos de los certificados de calibración del patrón de referencia se muestran en la tabla (3.1):

Certificado	Fecha de Calibración	Desviación (mg)	Incertidumbre Expandida (mg)
LM-2818 DKD-K-35001 2009-12	2009-12-15	0,2	1,6
LM-C-147-2011	2011-03-31	-0,4	1,6
LM-C-171-2012	2012-03-26	-1,8	1,6
LM-C-175-2013	2013-03-11	-2,3	1,6

Tabla 3.1: Valores de masa convencional del patrón de referencia

De la tabla (3.1) se obtienen las diferencias calibraciones sucesivas, las diferencias se muestran en la tabla (3.2):

Periodo	Deriva Instrumental (mg)
2009-2011	-0,6
2011-2012	-1,4
2012-2013	-0,5

Tabla 3.2: Diferencia del valor de masa convencional entre calibraciones sucesivas del patrón de referencia.

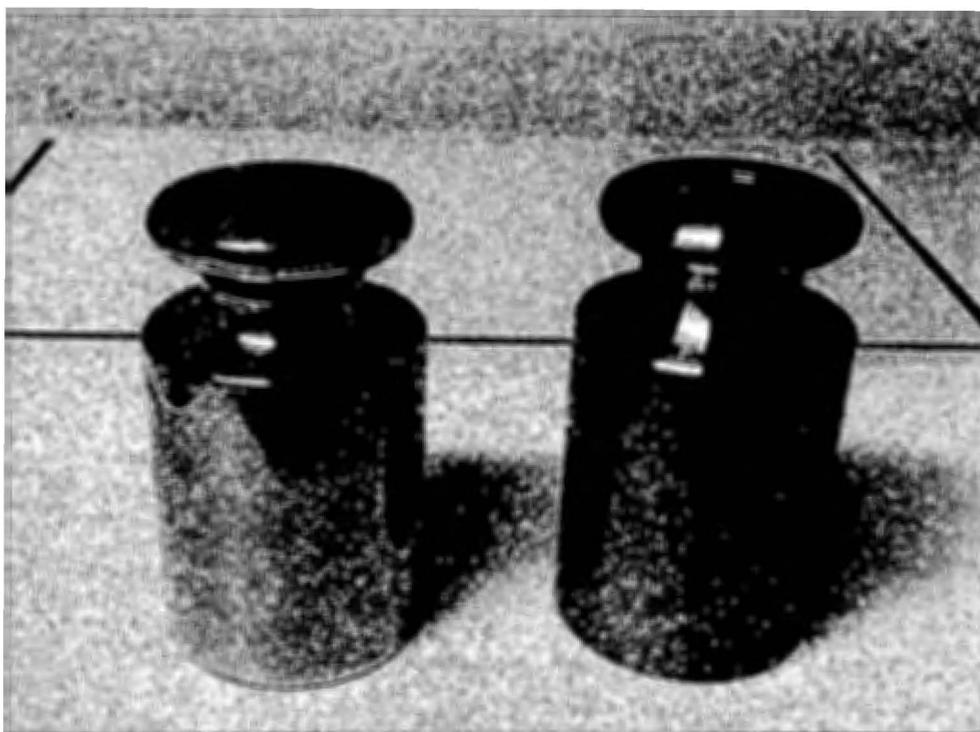


Figura 3.1: A la izquierda, el patrón de referencia, pesa de 1 kg de clase F1. A la derecha la pesa de ensayo, pesa de 1 kg de clase F2.

De la tabla (3.2) se obtiene el valor máximo de deriva instrumental del patrón de referencia el cual resulta ser 1,4 mg.

Las cargas adicionales son pesas de la clase E2 fabricadas en acero inoxidable, con valores nominales desde 1 mg hasta 5 mg, lo que se muestra en la tabla 3.3.

Certificado	Valor Nominal (mg)	Fecha de Calibración	Desviación (mg)	Incertidumbre Expandida (mg)
LM-C-693- 2012	1	2012-10-31	0,001	0,002
	2	2012-10-31	0,005	0,002
	2 (*)	2012-10-31	0,004	0,002
	5	2012-10-31	-0,001	0,002

Tabla 3.3: Valores de masa convencional de las cargas adicionales

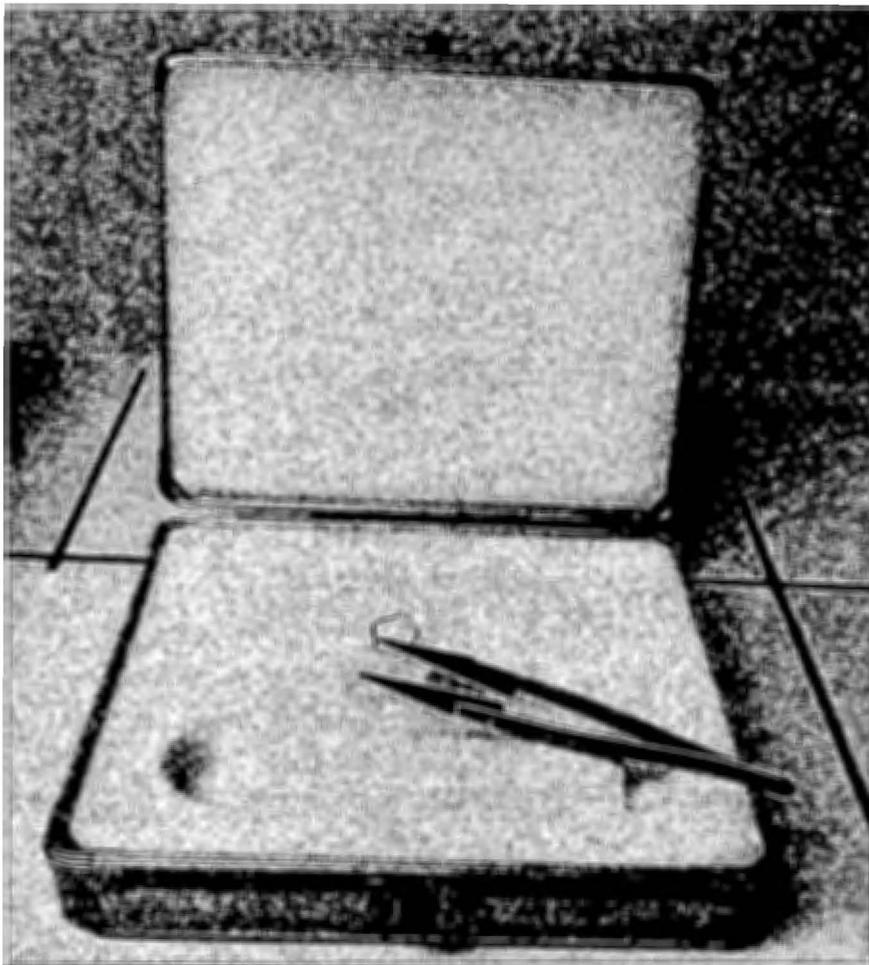


Figura 3.2: Pesas de 1 mg a 500 mg de clase E2, utilizadas para las cargas adicionales.

3.1.2. Balanza

La balanza usada para realizar las mediciones fue caracterizada durante cuatro semanas, resultando en un total de 40 mediciones, para determinar su contribución a la incertidumbre al proceso de pesa de forma confiable de la repetibilidad de ésta, y su respectiva contribución a la incertidumbre combinada.

Las características de la balanza se resumen la tabla (3.4):

Marca	Modelo	Serie	Resolución	Desviación Estándar
Kern	EW6200-2NM	087790018	10 mg	5,0031 mg

Tabla 3.4: Datos de la balanza utilizada

3.1.3. Instrumentos de Medición de Condiciones Ambientales

Se utilizaron los instrumentos de medición de condiciones ambientales cuyas características se detallan en la tabla 3.5. Los resultados de la calibración de los instrumentos se muestran en la tabla 3.6:

Instrumento	Marca	Modelo	Serie	Resolución
Termómetro	Radioshack	6300334	No indica	0,1 °C
Higrómetro	Radioshack	6300334	No indica	1%
Barómetro	Control Company	36934-162	122631873	1 mbar

Tabla 3.5: Instrumentos de medición de condiciones ambientales



Figura 3.3: Balanza utilizada para la calibración.

Instrumento	Punto de Calibración	Corrección	Incertidumbre (k=2)	Certificado de Calibración
Termómetro	14,7°C	0,3°C	0,35 °C	4245-4720572
	24,7°C	0,4°C	0,25 °C	
	29,4°C	0,6°C	0,25 °C	
Higrómetro	38,0%	1,5%	1,6%	LT-1054-2012
	59,0%	0,7%	1,8%	
	92,0%	3,4%	1,9%	
Barómetro	928 mbar	3,4 mbar	0,63 mbar	LT-1054-2012
	978 mbar	1,9 mbar	0,63 mbar	
	1 014 mbar	2,0 mbar	0,63 mbar	

Tabla 3.6: Resultados de la calibración de los instrumentos de medición de condiciones ambientales

3.2. SECUENCIA DE MEDICIÓN

Para obtener el valor de masa convencional de la pesa de ensayo, la secuencia de mediciones se realizó de la forma ABBA, la cantidad de mediciones realizadas se calculó a partir del valor de desviación estándar encontrado de la balanza, s , mostrado en la tabla (3.4) de acuerdo con la relación $n = \left(Zs/d \right)^2$, donde Z se obtiene de la distribución normal para un 95% de confianza y tiene un valor de 1,96 y d es el máximo aporte al



Figura 3.4: Instrumentos de medición de condiciones ambientales.

valor de incertidumbre total que esperamos alcanzar, que para este trabajo se ha considerado la quinta parte del error máximo permitido de la pesa de ensayo. Para este caso se ha determinado un valor de 10 para n .

La secuencia se detalla a continuación:

1. Registrar de condiciones ambientales iniciales.
2. Presionar el botón de cero de la balanza.

3. Colocar la pesa de referencia sobre la balanza, anotar la indicación.
4. Determinar el punto de cambio de la indicación, añadiendo cargas adicionales sucesivamente desde 1 mg hasta 9 mg, hasta que la indicación aumente en una unidad, anotar el valor de carga adicionado.
5. Colocar la pesa de ensayo sobre la balanza, anotar la indicación.
6. Determinar el punto de cambio de la indicación, añadiendo cargas adicionales sucesivamente desde 1 mg hasta 9 mg, hasta que la indicación aumente en una unidad anotar el valor de carga adicionado.
7. Colocar nuevamente la pesa de ensayo sobre la balanza, anotar la indicación.
8. Determinar el punto de cambio de la indicación, añadiendo cargas adicionales sucesivamente desde 1 mg hasta 9 mg, anotar el valor de carga adicionado.
9. Colocar la pesa de referencia sobre la balanza, anotar la indicación.
10. Determinar el punto de cambio de la indicación, añadiendo cargas adicionales sucesivamente desde 1 mg hasta 9 mg, anotar el valor de carga adicionado.

11. Repetir los pasos del 2 hasta el 10 hasta completar 10 mediciones.

12. Registrar de condiciones ambientales finales.

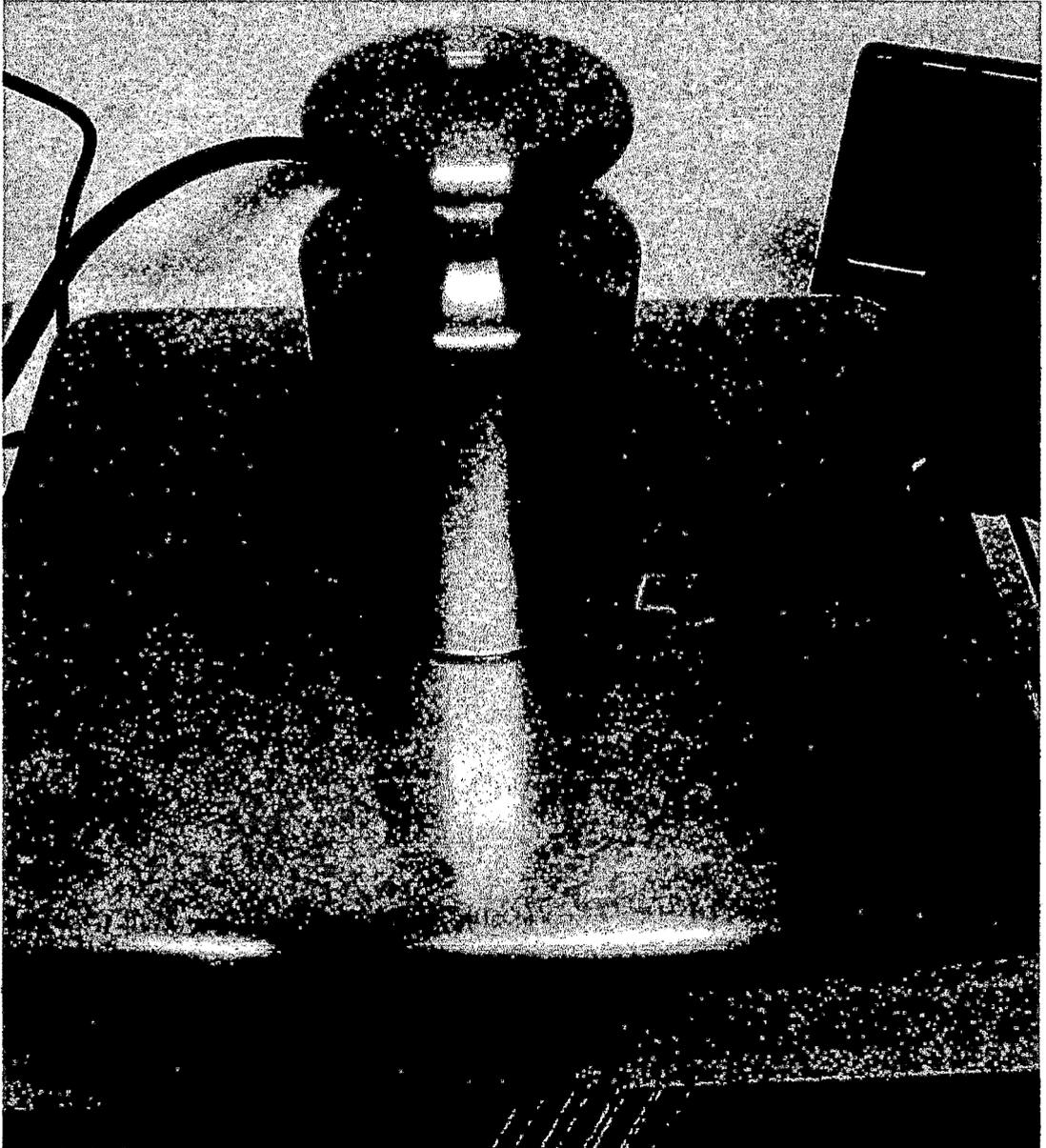


Figura 3.5: Proceso de calibración de la pesa de 1 kg clase F2.

3.3. DETERMINACIÓN DE LA MASA

Ya que un objeto sumergido en un fluido experimenta dos fuerzas: la fuerza de gravedad tirando hacia abajo y la fuerza de empuje hacia arriba, el método que se utiliza con más frecuencia para determinar la masa de un cuerpo es comparando la fuerza de gravedad que se ejerce sobre el plato receptor de carga de una balanza debida al cuerpo contra la fuerza ejercida por una pesa de valor conocido (patrón de referencia) del mismo valor nominal, otra fuerza que interviene en el resultado de ésta comparación es la fuerza debida al empuje del aire. Las fuerzas que actúan sobre la pesa son la fuerza de gravedad, el empuje del aire y la fuerza normal ejercida por el plato de la balanza sobre la pesa, tal como se aprecia en la figura (3.6). Existen además dos fuerzas adicionales, una fuerza debida a la convección del aire cuando la pesa no se encuentra en estabilidad térmica con éste, la cual puede despreciarse si deja estabilizar en el ambiente del laboratorio donde se realizará la calibración [5], y otra fuerza debida a la interacción magnética entre la pesa y la balanza, que se ha supuesto es lo suficientemente pequeña para el alcance de este trabajo.

De la figura (3.6) podemos obtener la ecuación de equilibrio de la pesa [10]:

$$F_g = F_b + F_N \quad (3.1)$$

Dónde:

- $F_g = mg$ es la fuerza gravitacional.
- m es la masa del objeto.
- g es la aceleración de la gravedad local.
- $F_b = \rho_a g V$ es la fuerza de empuje del aire (por el principio de Arquímedes).
- ρ_a es la densidad del aire.
- V es el volumen del objeto
- F_N es la fuerza normal ejercida por el plato de la balanza sobre la pesa y es igual a la indicación de la balanza (I) por la aceleración de la gravedad local.

Debido a que se hace uso de cargas adicionales para mejorar la indicación de la balanza, la indicación I de la balanza está dada por:

$$I = I_0 + \frac{1}{2}d - \Delta L \quad (3.2)$$

Sustituyendo las expresiones (2.3) y (2.4) para las fuerzas en la ecuación (3.1) se obtiene:

$$mg - \rho_a g V = gI \quad (3.3)$$

Que es equivalente a:

$$m - \rho_a V = I \quad (3.4)$$

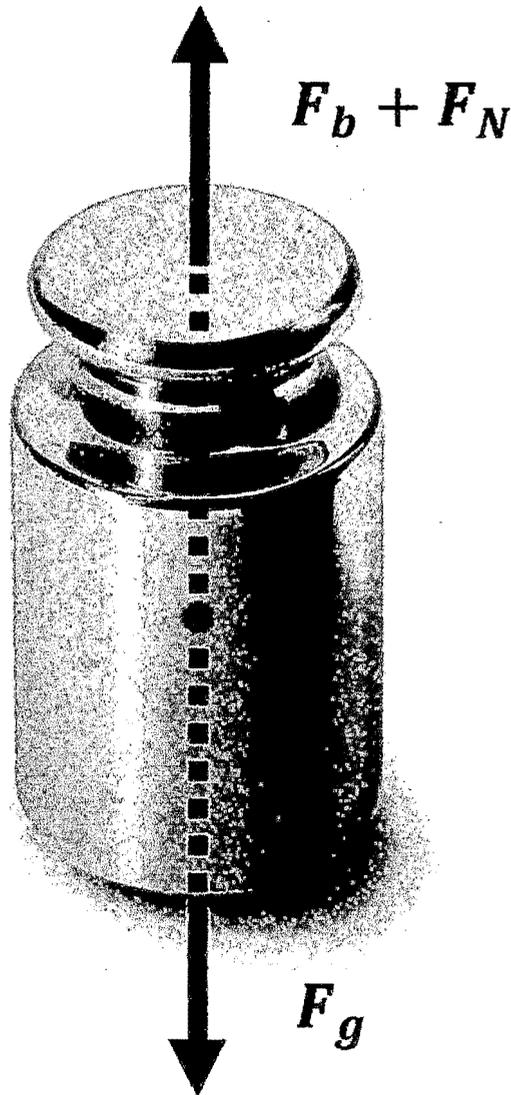


Figura 3.6: Fuerzas sobre un cuerpo en equilibrio colocado sobre una balanza.

La determinación de la masa se hace por comparación contra una referencia que es una pesa de valor de masa conocido (pesa de referencia).

Si se aplica la ecuación (3.4) a la pesada de la pesa de referencia con la pesa desconocida (pesa de ensayo) se obtiene la siguiente ecuación:

$$m_x - m_p + \rho_a(V_p - V_x) = I_x - I_p \quad (3.5)$$

Dónde:

- Los subíndices p y x representan a la pesa de referencia y a la pesa de ensayo respectivamente.

El miembro derecho de la igualdad anterior es la diferencia en lectura que hay entre la pesa de ensayo respecto a la pesa de referencia.

Sin embargo, el empuje del aire es raramente corregido en todas las pesadas. En casi todos los casos, un valor de medición de masa convencional no corregido por el empuje del aire, el cual es la base tomada en cuenta en el comercio cuando las mercancías son vendidas por peso, es considerado satisfactorio [17]. Para determinar la diferencia de indicaciones se utilizó, en este trabajo, el ciclo de pesada ABBA; para

este ciclo, la diferencia de masa convencional Δm_c entre la pesa de ensayo y la pesa de referencia está dada por la ecuación (3.6) [5]:

$$\Delta m_c = m_{cx} - m_{cp} \quad (3.6)$$

Si se realiza de un ciclo de pesaje, el valor de masa convencional para cada ciclo es:

$$\Delta m_{ci} = \Delta I_i + m_{cp} C_i \quad (3.7)$$

Dónde:

- $C_i = (\rho_{ai} - \rho_0) \times \left(\frac{1}{\rho_x} - \frac{1}{\rho_p} \right)$
- ρ_{ai} es la densidad del aire durante la medición i .
- ρ_0 es la densidad de referencia del aire ($1,2 \text{ kg/m}^3$)

Entonces se toma como valor de masa convencional la media de las mediciones para los n ciclos realizados:

$$\overline{\Delta m_c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta m_{ci} \quad (3.8)$$

Finalmente, el valor de masa convencional de la pesa de ensayo se puede calcular de la siguiente ecuación:

$$m_{cx} = m_{cp} + \overline{\Delta m_c} \quad (3.9)$$

3.4. CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE

La incertidumbre de medición incluye evaluaciones tanto de tipo A como de tipo B, las cuales se detallan a continuación:

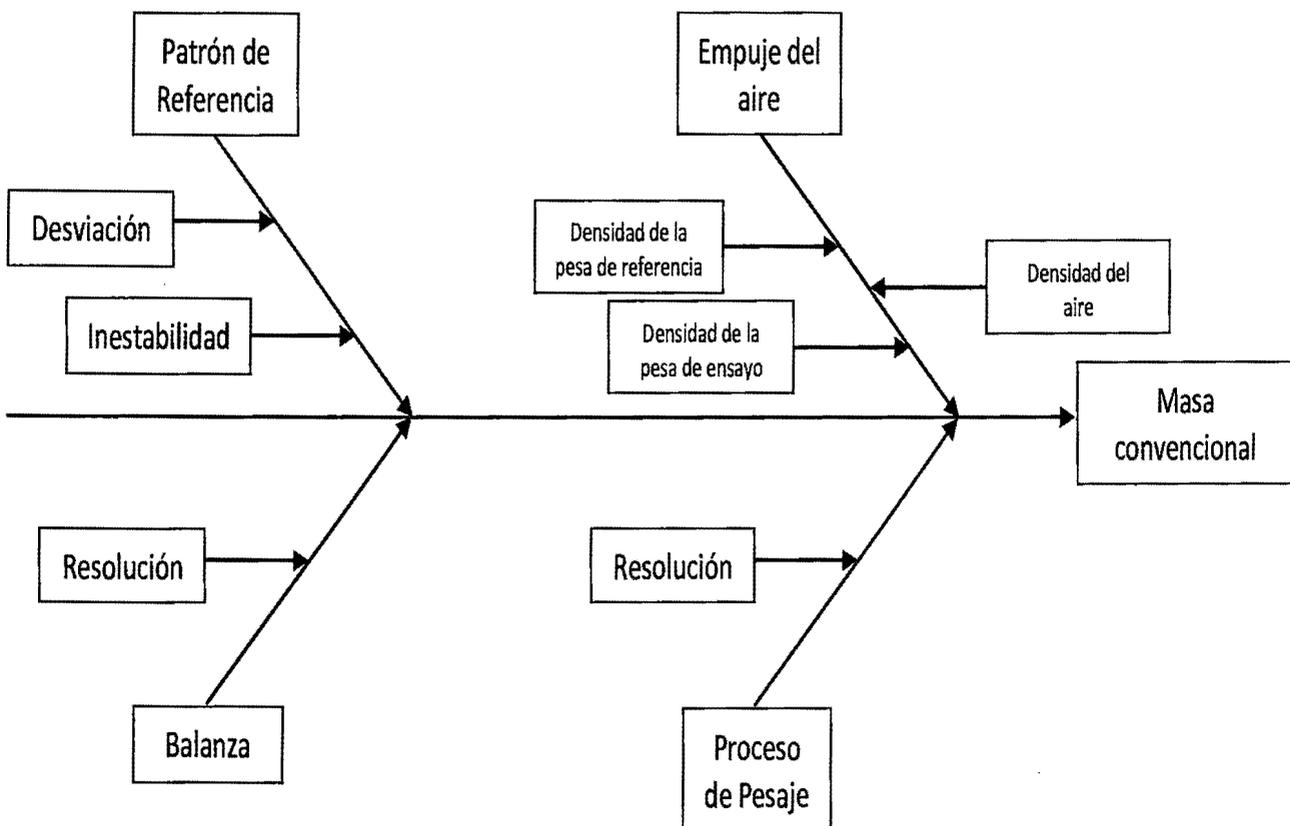


Figura 3.7: Diagrama de Ishikawa para las componentes de la incertidumbre de medición del valor de masa convencional

3.4.1. Incertidumbre del Proceso de Pesaje

Debido a que se utiliza una balanza bien caracterizada bajo control estadístico y el valor de masa $\overline{\Delta m_c}$ se determina a partir de n observaciones independientes, se hace un cálculo tipo A de la incertidumbre de medición, donde, de acuerdo a la ecuación (2.12), la varianza experimental de la media aritmética de las observaciones se estimó por s_p^2/n y la incertidumbre estándar es:

$$u(\overline{\Delta m_c}) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \quad (3.10)$$

3.4.2. Incertidumbre de la Pesa de Referencia

La incertidumbre debida a la pesa de referencia tiene dos componentes, una debida al conocimiento del valor de masa de la pesa de referencia al momento de su calibración y otra debida a la inestabilidad del valor de masa de la pesa en el tiempo.

El valor de masa de la pesa de referencia se obtiene de su certificado de calibración y la incertidumbre sobre este valor es obtenida a partir de un cálculo de tipo B, y es igual a la incertidumbre declarada en el certificado de calibración dividida entre el valor del factor de cobertura k

declarado en el mismo certificado, el cual usualmente tiene un valor de 2, resultando en la ecuación (3.11):

$$u_{cert}(m_{cr}) = \frac{U}{k} \quad (3.11)$$

La otra componente debida a la inestabilidad del valor de masa de la pesa de referencia en el tiempo, llamada deriva instrumental, se calcula a partir de los cambios de masa observados después de haber calibrado la pesa de referencia varias veces, tomando la máxima diferencia de masa entre dos calibraciones consecutivas, D . Asignando a este cambio una distribución de probabilidad de rectangular (cálculo tipo B) y de acuerdo a lo establecido en 2.3.6.2 se tiene:

$$u_{inst}(m_{cr}) = \frac{D}{\sqrt{3}} \quad (3.12)$$

Finalmente, la incertidumbre debida a la pesa de referencia viene dada por:

$$u(m_{cr}) = \sqrt{\left(\frac{U}{k}\right)^2 + u_{inst}^2(m_{cr})} \quad (3.13)$$

3.4.3. Incertidumbre de la Corrección por Empuje del Aire

La incertidumbre de la corrección por empuje del aire es calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$u_b^2 = \left[m_{cr} \frac{(\rho_r - \rho_t)}{\rho_r \rho_t} u(\rho_a) \right]^2 + [m_{cr}(\rho_a - \rho_0)]^2 \frac{u^2(\rho_t)}{\rho_t^4} + m_{cr}^2(\rho_a - \rho_0)[(\rho_a - \rho_0) - 2(\rho_{a1} - \rho_0)] \frac{u^2(\rho_r)}{\rho_r^4} \quad (3.14)$$

Dónde:

- ρ_{a1} es la densidad de referencia del aire durante la calibración de la pesa de referencia.
- ρ_a es la densidad de referencia del aire durante la calibración.
- ρ_0 es la densidad de referencia del aire ($1,2 \text{ kg/m}^3$)
- ρ_r es la densidad de la pesa de referencia.
- ρ_t es la densidad de la pesa de ensayo.

La densidad ρ_1 de la pesa de referenciase calcula a partir de los datos de condiciones ambientales contenidos en su certificado de calibración, de forma similar, ρ_a se calcula a partir de los datos de condiciones ambientales tomados durante la calibración de la pesa de ensayo, a partir de la fórmula del CIPM [18] dada en el anexo 2.

La varianza de la densidad del aire se calcula a partir de la ecuación (3.15).

$$u^2(\rho_a) = u_F^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial p} u_p\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial t} u_t\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} u_{hr}\right)^2 \quad (3.15)$$

Dado que la temperatura ambiente, la humedad relativa y la presión atmosférica en el laboratorio son cercanas a 20 °C, 50% y 101 325 Pa, respectivamente, se utilizan los siguientes valores numéricos de forma aproximada [18]:

$$\left. \begin{aligned} u_F &= 10,3 \times 10^{-5} \rho_a \\ \frac{\partial \rho_a}{\partial p} &= 10^{-5} \rho_a \text{Pa}^{-1} \\ \frac{\partial \rho_a}{\partial t} &= -4 \times 10^{-3} \rho_a \text{K}^{-1} \\ \frac{\partial \rho_a}{\partial hr} &= -9 \times 10^{-3} \rho_a \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

Los valores de u_p , u_t y u_{hr} dependen de los instrumentos de medición de las condiciones ambientales utilizados y hr está expresado como fracción.

La densidad de la pesa de referencia ρ_r y la densidad de la pesa de ensayo ρ_t se estiman en base a las composiciones (que son conocidas) de las aleaciones de las cuales están hechas ambas pesas, de acuerdo a lo establecido por el método F2 para la determinación de la densidad de una pesa [5], por lo que las componentes respectivas de la incertidumbre se harán a partir de un cálculo tipo B asumiendo una distribución de probabilidad rectangular (ecuación (2.13)), como sigue:

$$\left. \begin{aligned} u(\rho_r) &= \frac{U(\rho_r)}{\sqrt{3}} \\ u(\rho_t) &= \frac{U(\rho_t)}{\sqrt{3}} \end{aligned} \right\} (3.17)$$

Dónde:

- $U(\rho_r)$ y $U(\rho_t)$ son valores dados en la tabla B.7 de [5].

3.4.4. Incertidumbre de la Balanza

Debido al tamaño y el material de las pesas utilizadas, tanto de referencia como la de ensayo, no se considera la componente a la incertidumbre debida a la carga excéntrica sobre la balanza ni la componente debida al magnetismo.

Por lo tanto, se considera sólo una componente en la incertidumbre de la balanza, una debida a la visualización de la resolución de la balanza, ya que esta es digital, y se haya mediante un cálculo tipo B asumiendo una distribución de probabilidad rectangular a partir de la ecuación (2.13):

$$u_d = \left(\frac{d/10}{2\sqrt{3}} \right) \times \sqrt{2} \quad (3.18)$$

Dónde:

- d es la resolución de la balanza utilizada en la calibración.
- El término 10 proviene del uso de las cargas adicionales con un valor que es la décima parte de d .
- El término $\sqrt{2}$ proviene de la doble contribución del hecho de leer dos veces la indicación, una para la pesa de referencia y otra para la pesa de ensayo.

Por lo que la incertidumbre de la balanza u_{bal} viene dada por:

$$u_{bal} = u_d \quad (3.19)$$

3.4.5. Incertidumbre Combinada del Valor de Masa Convencional

La incertidumbre estándar combinada del valor de masa convencional de la pesa de ensayo viene dada por la combinación cuadrática de las ecuaciones (3.10), (3.13), (3.14) y (3.19) de acuerdo a la ecuación (2.14), obteniendo:

$$u_c(m_{ct}) = \sqrt{u^2(\overline{\Delta m_c}) + u^2(m_{cr}) + u_b^2 + u_{bal}^2} \quad (3.20)$$

3.4.6. Incertidumbre Expandida del Valor de Masa Convencional

El valor de la incertidumbre expandida se calcula usando la siguiente ecuación:

$$U(m_{ct}) = k \times u_c(m_{ct}) \quad (3.21)$$

Dónde:

- k es el factor de cobertura.

El factor de cobertura, en general, puede ser calculado asumiendo una distribución normal de la probabilidad final del valor de masa convencional, por lo que k tomaría el valor de 2 para un nivel de confianza de aproximadamente 94,45%, sin embargo, para fines de validación de los

resultados obtenidos en el presente trabajo, el valor de k se calcula a partir de la distribución t asumiendo un nivel de confianza de 94,45% con v_{eff} grados de libertad efectivos, calculado a partir de la fórmula de Welch–Satterthwaite (ecuación (2.15)).

3.5. Validación de los Resultados

Para que el resultado de valor de masa convencional obtenido sea admitido como válido, éste debe satisfacer dos condiciones:

- Ser estadísticamente compatible con el valor de masa convencional hallado usando un método normalizado de medición.
- Su incertidumbre expandida debe ser menor que la tercera parte del error máximo permitido de la pesa de ensayo.

Para determinar la conformidad con los requisitos anteriormente establecidos, se plantean pruebas de hipótesis para el valor de masa convencional y para su respectiva incertidumbre.

3.5.1. Prueba para la Incertidumbre

La prueba de que la incertidumbre del valor de masa convencional es menor que la tercera parte del error máximo permitido de la pesa de

ensayo se hace mediante el uso de la prueba χ^2 . Las hipótesis son las siguientes:

$$H_0: U(m_{ct}) \geq \frac{emp}{3}$$

$$H_1: U(m_{ct}) < \frac{emp}{3}$$

Para lo cual, el estadístico de prueba es:

$$\chi_c^2 = \frac{v_{eff} \times U^2(m_{ct})}{\left(\frac{emp}{3}\right)^2} \quad (3.22)$$

Donde, H_0 se rechaza si $\chi_c^2 < \chi_{0,05}^2(v_{eff})$ para un nivel de significancia de 0,05.

3.5.2. Prueba para el Valor de Masa Convencional

Para comprobar que el valor de masa convencional encontrado con el método del presente trabajo es compatible con el valor de masa convencional encontrado usando un método normalizado primero se verifican las incertidumbres de ambos valores y luego, dependiendo de la homogeneidad o no de las varianzas se procede a utilizar alguna de las variaciones de la prueba t.

Para verificar la homogeneidad de las incertidumbres se hace uso de la prueba F . Las hipótesis son las siguientes:

$$H_0: U(m_{ct})/U'(m_{ct}) = 1$$

$$H_1: U(m_{ct})/U(m'_{ct}) \neq 1$$

Dónde:

- $U(m'_{ct})$ es la incertidumbre del valor de masa convencional de la pesa de ensayo determinada a partir de un procedimiento normalizado.

Para lo cual, el estadístico de prueba es:

$$F_c = \frac{U^2(m_{ct})}{U^2(m'_{ct})} \quad (3.23)$$

Donde, H_0 se rechaza si $F_c < F_{0,025}(v_{eff}, v'_{eff})$ para un nivel de significancia de 0,05.

Luego se procede se procede a probar los valores de masa convencional mediante el uso de la prueba t, las hipótesis son las siguientes:

$$H_0: m_{ct} = m'_{ct}$$

$$H_1: m_{ct} \neq m'_{ct}$$

El estadístico de prueba depende de la homogeneidad de las incertidumbres, para incertidumbres homogéneas se utiliza el estadístico de prueba dado por la ecuación (3.24), pero si las incertidumbres son heterogéneas se utiliza el estadístico de prueba dado por la ecuación (3.26).

Para incertidumbres homogéneas:

$$t_c = \frac{(m_{ct} - m'_{ct})}{\sqrt{S_P^2 \left(\frac{1}{v_{eff}+1} + \frac{1}{v'_{eff}+1} \right)}} \quad (3.24)$$

Con:

$$S_P^2 = \frac{v_{eff} \times U^2(m_{ct}) + v'_{eff} \times U^2(m'_{ct})}{v_{eff} + v'_{eff}} \quad (3.25)$$

Donde, H_0 se rechaza si $t_c < t_{0,025}(v_{eff} + v'_{eff})$ o $t_c > t_{0,975}(v_{eff} + v'_{eff})$ para un nivel de significancia de 0,05.

Para incertidumbres heterogéneas:

$$t_c = \frac{(m_{ct} - m'_{ct})}{\sqrt{\frac{U^2(m_{ct})}{v_{eff}+1} + \frac{U^2(m'_{ct})}{v'_{eff}+1}}} \quad (3.26)$$

Donde, H_0 se rechaza si $|t_c| > t_{0,025}(H)$ para un nivel de significancia de 0,05.

Con:

$$H = \frac{\left(\frac{U^2(m_{ct})}{v_{eff}+1} + \frac{U^2(m'_{ct})}{v'_{eff}+1}\right)^2}{\frac{\left(\frac{U^2(m_{ct})}{v_{eff}+1}\right)^2}{v_{eff}} + \frac{\left(\frac{U^2(m'_{ct})}{v'_{eff}+1}\right)^2}{v'_{eff}}} \quad (3.27)$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación.

4.1. RESULTADOS

Los resultados de las mediciones se presentan en la tabla (4.2):

Condiciones Ambientales		
Magnitud	Inicial	Final
Temperatura	23,4°C	23,8°C
Humedad Relativa	50,3%	55,5%
Presión	999,0 mbar	999,0 mbar

Tabla 4.1: Condiciones ambientales corregidas durante la calibración.

Mediciones de Masa

Nº	Secuencia	Indicación (g)	ΔL (mg)	Nº	Secuencia	Indicación (g)	ΔL (mg)
1	A ₁	1 000,06	4	6	A ₁	1 000,05	4
	B ₁	1 000,06	3		B ₁	1 000,06	2
	B ₂	1 000,06	4		B ₂	1 000,05	2
	A ₂	1 000,06	6		A ₂	1 000,06	6
2	A ₁	1 000,05	5	7	A ₁	1 000,05	5
	B ₁	1 000,06	5		B ₁	1 000,05	4
	B ₂	1 000,05	6		B ₂	1 000,05	2
	A ₂	1 000,06	4		A ₂	1 000,05	4
3	A ₁	1 000,06	5	8	A ₁	1 000,06	6
	B ₁	1 000,05	3		B ₁	1 000,05	2
	B ₂	1 000,06	4		B ₂	1 000,06	2
	A ₂	1 000,06	6		A ₂	1 000,06	5
4	A ₁	1 000,05	4	9	A ₁	1 000,05	5
	B ₁	1 000,05	2		B ₁	1 000,05	4
	B ₂	1 000,06	3		B ₂	1 000,06	3
	A ₂	1 000,06	5		A ₂	1 000,06	5
5	A ₁	1 000,05	6	10	A ₁	1 000,06	4
	B ₁	1 000,05	2		B ₁	1 000,06	4
	B ₂	1 000,06	4		B ₂	1 000,05	3
	A ₂	1 000,06	6		A ₂	1 000,05	5

Tabla 4.2: Resultados de las mediciones de masa.

4.2. TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS

4.2.1. Valor de Masa Convencional

A partir de los resultados de la tabla (4.2) podemos calcular el valor de masa convencional de la pesa de ensayo, haciendo uso de la ecuación (3.7) se obtiene:

$$m_{ct} = 999,9985 \text{ g}$$

4.2.1. Incertidumbre de la Medición

La incertidumbre de cada componente se detalla a continuación:

4.2.1.1. Incertidumbre del Proceso de Pesaje

Usando la ecuación (3.10) y el valor de la desviación estándar de la balanza obtenido en su caracterización, el cual se da en la tabla (3.4), se obtiene:

$$u(\overline{\Delta m_c}) = 1,582 \text{ mg}$$

4.2.1.2. Incertidumbre de la Pesa de Referencia

Usando la ecuación (3.11) y la incertidumbre de la calibración del patrón de referencia dado en la tabla (3.1) se obtiene:

$$u_{cert}(m_{cr}) = 0,800 \text{ mg}$$

La componente debida a la inestabilidad o deriva de la pesa de referencia se obtiene de reemplazar el máximo valor encontrado en la tabla (3.2) en la ecuación (3.12).

$$u_{inst}(m_{cr}) = 0,924 \text{ mg}$$

La incertidumbre total debida a la pesa de referencia se calcula a partir de la ecuación (3.13):

$$u(m_{cr}) = 1,222 \text{ mg}$$

4.2.1.3. Incertidumbre de la Corrección por Empuje del Aire

Ya que ambas pesas han sido fabricadas tanto en acero inoxidable, se puede obtener el valor de densidad y su incertidumbre respectiva haciendo uso de método F2 [5], lo cual se muestra en la tabla (4.3).

Aleación / Material	Densidad Supuesta	Incertidumbre (k=2)
Acero Inoxidable	$7\,950\text{ kg m}^{-3}$	140 kg m^{-3}

Tabla 4.3: Densidad del material de la pesa de referencia

Haciendo uso de la ecuación (3.17) se obtiene la contribución a la incertidumbre por la densidad de las pesas:

$$u(\rho_r) = 80,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$u(\rho_t) = 80,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

A partir de la ecuación (3.15) se obtiene la contribución a la incertidumbre por la densidad del aire:

$$u(\rho_a) = 1,554E - 03 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Finalmente, usando la ecuación (3.14) obtenemos la incertidumbre de la corrección por empuje del aire:

$$u_b^2 = 1,23 \times 10^{-4} \text{mg}^2$$

4.2.1.4. Incertidumbre de la Balanza

A partir de la ecuación (2.13):

$$u_d = 0,408 \text{ mg}$$

Por lo que la incertidumbre de la balanza u_{bal} viene dada por:

$$u_{bal} = 0,408 \text{ mg}$$

4.2.1.5. Incertidumbre Combinada del Valor de Masa Convencional

La incertidumbre estándar combinada del valor de masa convencional de la pesa de ensayo viene dada por la combinación cuadrática de todas las componentes anteriormente calculadas, de acuerdo a la ecuación (2.14), obteniendo:

$$u_c(m_{ct}) = 2,040 \text{ mg}$$

Magnitud de Entrada x_i		Valor Estimado de x_i	Incertidumbre Estándar $u(x_i)$	Distribución de Probabilidad	Coefficiente de Sensibilidad $\frac{\partial f}{\partial x_i}$	Contribución a la Incertidumbre $u_c^2(m_{ct})$ (mg)		Contribución Porcentual (%)	Grados de Libertad
Proceso de Pesaje	$\overline{\Delta m_c}$	0,800 mg	1,582 mg	Normal	1	2,503		60,124	39
Pesa de Referencia	m_{cert}	999,998 g	0,800 mg	Normal	1	0,640	1,493	35,870	∞
	m_{inst}	0 mg	0,924 mg	Rectangular	1	0,853			
Empuje del Aire	ρ_a	1,166 kg/m ³	1,487 $\times 10^{-3}$ kg/m ³	Normal	0 m ³	0	1,227 $\times 10^{-4}$	0,003	∞
	ρ_r	7 950 kg/m ³	80,8 kg/m ³	Rectangular	$-2,679$ $\times 10^{-19}$ m ³	$-1,750$ $\times 10^{-3}$			
	ρ_t	7 950 kg/m ³	80,8 kg/m ³	Rectangular	$2,867$ $\times 10^{-19}$ m ³	$1,873$ $\times 10^{-3}$			
Balanza	d	0 mg	0,408 mg	Rectangular	1	0,167		4,003	∞
Incertidumbre Combinada $u_c(m_{ct})$						2,040		Grados de Libertad (v_{eff})	108

Tabla 4.4: Presupuesto de incertidumbre.

4.2.1.6. Incertidumbre Expandida del Valor de Masa Convencional

Para el cálculo de la incertidumbre expandida se tiene que encontrar previamente los grados de libertad efectivos de la incertidumbre combinada, para lo que se hace uso de la ecuación de Welch – Satterthwaite (ecuación (2.15)). Este resultado se presenta en la tabla (4.4) junto al resumen de los resultados de todas las componentes de la incertidumbre combinada.

Para un nivel de confianza de aproximadamente 94,95% el valor de k se obtiene de la distribución t de Student, para 108 grados de libertad el valor de k es 1,98. El valor de la incertidumbre expandida se calcula usando la ecuación (3.21):

$$U(m_{ct}) = k \times u_c(m_{ct}) = 1,98 \times 2,040 = 4,035 \text{ mg}$$

Finalmente, el resultado de la calibración se presenta con 2 cifras significativas en la tabla (4.5):

Valor Nominal	Masa	Incertidumbre
	Convencional	Expandida
1 000 g	1 000 g – 1,5 mg	4,0 mg

Tabla 4.5: Resultado de la calibración de una pesa de 1 kg de clase de exactitud F2

4.3. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

A continuación se comparan los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación con los obtenidos mediante el uso de un método normalizado [5]. Los resultados obtenidos mediante el uso del método normalizado se muestran en la tabla (4.6), en la tabla (4.7) se presenta el presupuesto de incertidumbre del valor convencional de masa encontrado con el mismo método.

Valor Nominal	Masa	Incertidumbre	Grados de
	Convencional	Expandida	Libertad
1 000 g	1 000 g – 1,1 mg	2,6 mg	32 739

Tabla 4.6: Resultado de la calibración de una pesa de 1 kg de clase de exactitud F2 obtenidos mediante el uso de un método normalizado

Magnitud de Entrada x_i		Valor Estimado de x_i	Incertidumbre Estándar $u(x_i)$	Distribución de Probabilidad	Coefficiente de Sensibilidad $\frac{\partial f}{\partial x_i}$	Contribución a la Incertidumbre $u_c^2(m_{ct})$ (mg)		Contribución Porcentual (%)	Grados de Libertad
Proceso de Pesaje	$\overline{\Delta m_c}$	1,190 mg	0,244 mg	Normal	1	2,503		3,451	39
Pesa de Referencia	m_{cert}	999,998 g	0,800 mg	Normal	1	0,640	1,493	86,855	∞
	m_{inst}	0 mg	0,924 mg	Rectangular	1	0,853			
Empuje del Aire	ρ_a	1,167 kg/m ³	1,441 × 10 ⁻³ kg/m ³	Normal	0 m ³	0	3,474 × 10 ⁻¹⁶	0,000	∞
	ρ_r	7 950 kg/m ³	80,8 kg/m ³	Rectangular	-2,682 × 10 ⁻¹⁹ m ³	-2,168 × 10 ⁻³			
	ρ_t	7 950 kg/m ³	80,8 kg/m ³	Rectangular	2,725 × 10 ⁻¹⁹ m ³	2,203 × 10 ⁻³			
Balanza	d	0 mg	0,408 mg	Rectangular	1	0,167		9,694	∞
Incertidumbre Combinada $u_c(m_{ct})$						1,311		Grados de Libertad (v_{eff})	32739

Tabla 4.7: Presupuesto de incertidumbre para el valor de masa convencional obtenido mediante el uso del método normalizado.

Los resultados se presentan además en la figura (4.1):

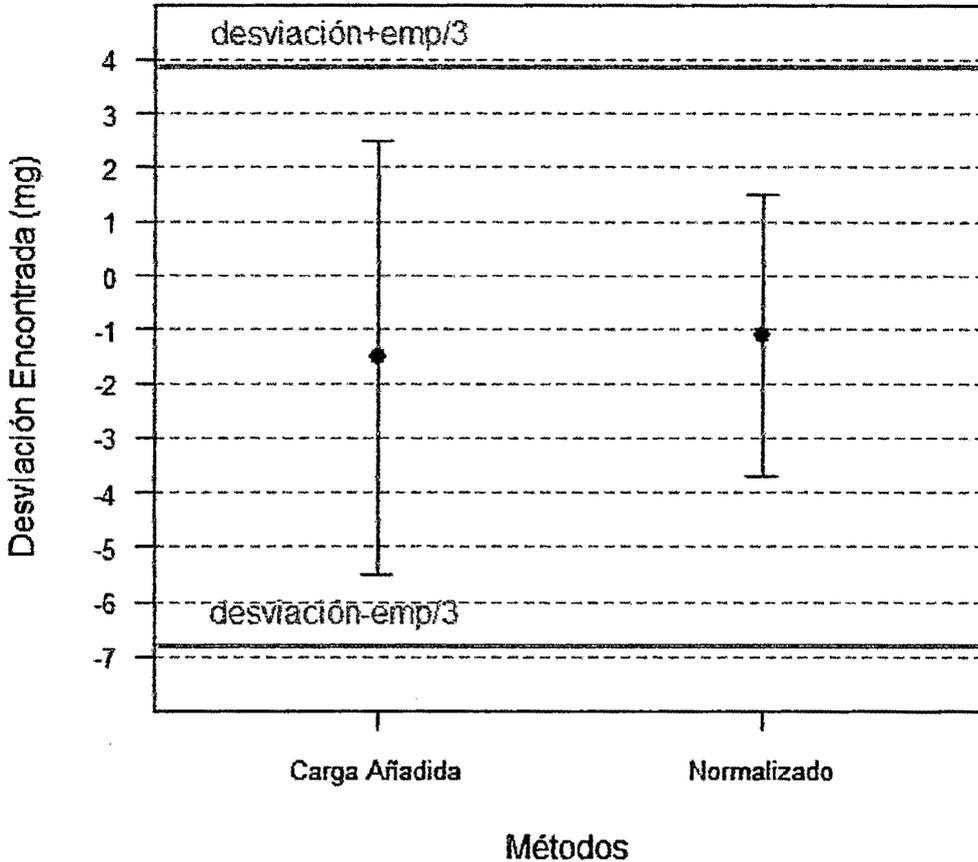


Figura 4.1: Comparación entre los resultados obtenidos mediante dos métodos.

La primera observación que puede hacerse parte de comparar las tablas (4.4) y (4.7), vemos que hay una gran diferencia en los grados de libertad de ambas mediciones, siendo mucho mayor los grados de libertad para el método normalizado, esto se debe a que la mayoría de las componentes han sido obtenidas mediante un cálculo de tipo de B, por lo que se considera que poseen infinitos grados de libertad y los grados efectivos dependen exclusivamente de las componentes que han sido

obtenidas mediante un cálculo tipo A, es así que la cantidad de grados de libertades calculada como:

$$\frac{v_{\Delta m_c} \times u_c^4(y)}{u^4(\Delta m_c)}$$

Aunque la cantidad de grados de libertad para la componente debida al proceso de pesaje para ambos métodos es la misma, el valor de ésta obtenida mediante el método normalizado es aproximadamente 3 veces menor que la obtenido en el presente trabajo, esto genera un gran aumento en los grados de libertad debido a que éstos dependen de la cuarta potencia de la componente debida al proceso de pesaje. La mayor cantidad de grados de libertad puede interpretarse también como que la confianza en el resultado es mayor, sin embargo lo que se busca no es demostrar que un método es mejor que el otro, sino que puede ser utilizado para determinar la masa convencional sin salir de las exigencias de un correcto método de calibración.

Observando la figura (4.1), puede verse claramente que, en cuanto al resultado del valor convencional de masa, ambos valores son muy cercanos, sin embargo más adelante se establece una prueba de hipótesis para probar que la diferencia entre estos valores no es significativa. Se evidencia que la incertidumbre expandida obtenida en el presente trabajo es mayor que la obtenida con el método convencional,

sin embargo también puede observarse que la incertidumbre expandida en el presente trabajo es menor que la tercera parte del error máximo permitido para la pesa de 1 kg de clase F2, con lo cual se cumple un requisito para la calibración de pesas, esto se comprobará más adelante mediante una prueba de hipótesis.

4.3.1. Prueba para la Incertidumbre

De acuerdo a lo establecido en 3.5.1 las hipótesis son:

$$H_0: U(m_{ct}) \geq \frac{emp}{3}$$

$$H_1: U(m_{ct}) < \frac{emp}{3}$$

Hacemos uso de la prueba χ^2 . El estadístico de prueba se calcula con la ecuación (3.22):

$$\chi_c^2 = 60,75$$

El valor crítico de la distribución χ_c^2 con 108 es:

$$\chi_{0,05}^2(v_{eff}) = 85,01$$

Por lo tanto, para un nivel de significancia de 0,05 se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que la incertidumbre expandida de calibración obtenida en el presente trabajo es menor a un tercio del error máximo permitido de la pesa de 1 kg de clase F2, con lo que se comprueba lo observado en el análisis exploratorio inicial de los datos.

4.3.2. Prueba para el Valor de Masa Convencional

Primero se verifica la homogeneidad de las incertidumbres de acuerdo a lo establecido en 3.5.2. Las hipótesis son las siguientes:

$$H_0: U(m_{ct}) / U'(m_{ct}) = 1$$

$$H_1: U(m_{ct}) / U(m'_{ct}) \neq 1$$

Hacemos uso de la prueba F_C . El estadístico de prueba se calcula con la ecuación (3.23):

$$F_c = 1,573$$

El valor crítico de la distribución F para 32 739 en el denominador y 108 en el numerador es:

$$F_{0,025}(v_{eff}, v'_{eff}) = 0,751$$

Por lo tanto, para un nivel de significancia de 0,05 se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que las incertidumbres expandidas de calibración obtenidas con ambos métodos de calibración son heterogéneas, comprobando lo que ya se había observado en la figura (4.1).

Debido a que las incertidumbres expandidas son heterogéneas, ahora se hace uso de la prueba t para muestras con varianzas heterogéneas, las hipótesis son las siguientes:

$$H_0: m_{ct} = m'_{ct}$$

$$H_1: m_{ct} \neq m'_{ct}$$

El estadístico de prueba se calcula con la ecuación (3.26):

$$t = -1,031$$

Se calculan los grados de libertad efectivos H con la ecuación (3.27).

$$H = 108$$

El valor crítico de la distribución t para 108 es:

$$t_{0,975}(H) = 1,982$$

Por lo tanto, para un nivel de significancia de 0,05 se acepta la hipótesis nula, concluyendo que los valores de masa convencional de la pesa de ensayo obtenidos con ambos métodos de calibración son iguales.

Con esto se comprueba que la diferencia entre ambos resultados de valor convencional de masa no es significativa, por lo que es indiferente el uso de un método y otro, quedando así demostrado que el uso del método alternativo mediante el uso de cargas adicionales puede usarse eficazmente para la calibración de pesas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se ha encontrado que hay consistencia en las mediciones realizadas, esto se puede apreciar en la figura (4.1).

De acuerdo con los resultados del análisis estadístico de los resultados del valor de masa convencional, se observa que no hay un efecto significativo causado por los métodos de calibración. Así mismo. Se observa un aumento de la incertidumbre del valor de masa convencional al ser ésta medida utilizando el método de cargas adicionales, sin embargo es consistente con los requisitos establecidos en la OIML R 111-1 [5].

Por lo tanto, para un nivel de significancia de 0,05 se acepta la hipótesis nula, concluyendo que los valores de masa convencional de la pesa de ensayo obtenidos con ambos métodos de calibración son iguales.

Finalmente, con esto se comprueba que la diferencia entre ambos resultados de valor convencional de masa no es significativa, por lo que

es indiferente el uso de un método y otro, quedando así demostrado que el uso del método alternativo mediante el uso de cargas adicionales puede usarse eficazmente para la calibración de pesas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] http://www.indecopi.gob.pe/0/modulos/JER/JER_Interna.aspx?ARE=0&PFL=13&JER=354
- [2] http://www.indecopi.gob.pe/repositorioaps/0/0/jer/acre01/Direct_Organ_Eva_Conf/Lab_Calibracion/LabCalibracion%2862%29.pdf
- [3] Diario Gestión, 5 de octubre del 2012, año 23 número 6338, Perú, 2012
- [4] International Organization for Standardization, ISO 14253-1: Geometrical Product Specifications (GPS) - Inspection by Measurement of Workpieces and Measuring Equipment Part 1: Decision Rules for Proving Conformance or Non-Conformance with Specifications, 1998
- [5] Technical Committee 9 Subcommittee 3: Weights, OIML R 111-1 Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃, International Organization of Legal Metrology, Francia, 2004
- [6] Becerra L. y col., Guía Técnica de Trazabilidad e Incertidumbre en la Magnitud de Masa (Calibración de Instrumentos para Pesar de Funcionamiento No Automático), Entidad Mexicana de Acreditación, México, 2008
- [7] Joint Committee for Guides in Metrology, Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, JCGM, Francia, 2008

- [8] Servicio Nacional de Metrología - INDECOPI, Vocabulario Internacional de Metrología – Conceptos Fundamentales y Generales, y Términos Asociados (VIM), INDECOPI, Perú, 2008
- [9] Centro Español de Metrología, Procedimiento ME-007 y ME-015 en la Calibración de Masas: Determinación del Valor Convencional de Masa, CEM, España, 2011
- [10] Becerra L. y Nava J., Incertidumbre en la Calibración de Pesas por el Método ABBA, Centro Nacional de Metrología, México, 2004
- [11] Kornblit, F. y col., Comparación de Criterios para la Estimación del Factor de Sensibilidad en la Calibración de Masas por Comparación, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina, 2010
- [12] Mason G. y col., Physical Science Concepts - Second Edition, Brigham Young University, United States of America, 1997
- [13] Centro Español de Metrología, El Sistema Internacional de Unidades, CEM, España, 2008
- [14] Technical Committee 9 Subcommittee 3: Weights, OIML D28 Conventional Value of the Result of Weighing in Air, International Organization of Legal Metrology, Francia, 2004
- [15] Alonso M. y Finn E., Fundamental University Physics: Volume I - Mechanics, Addison-Wiley Publishing Company, U.S.A., 1967
- [16] Serway R., Physics for Scientists and Engineers: Part 1. Mechanics, Brookes/Cole, United States of America, 2010

[17] La Guía Metas #5, Masa Real y Masa Convencional, Metas & Metrologos Asociados, México, 2006

[18] Picard A. y col., Revised Formula for the Density of Moist Air (CIPM-2007), Metrología 45, 2008

ANEXOS

ANEXO 1: VOCABULARIO

Los términos presentados a continuación complementan al presente trabajo de investigación, logrando así un mejor entendimiento.

Magnitud

Propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia.

NOTA 1 El concepto genérico de magnitud puede dividirse en varios niveles de conceptos específicos, como muestra la tabla siguiente. La mitad izquierda de la tabla presenta conceptos específicos de "magnitud". Estos (a su vez) son conceptos genéricos para las magnitudes individuales mostradas en la columna derecha de la tabla.

NOTA 2 La referencia puede ser una unidad de medida, un procedimiento de medición, un material de referencia o una combinación de ellos.

NOTA 3 Las series de normas internacionales ISO 80000 e IEC 80000 Magnitudes y Unidades, establecen los símbolos de las magnitudes. Estos símbolos se escriben en caracteres itálicos. Un símbolo dado puede referirse a magnitudes diferentes.

NOTA 4 El formato preferido por la IUPAC/IFCC para la designación de las magnitudes en laboratorios médicos es “Sistema-Componente; naturaleza de la magnitud”.

EJEMPLO “Plasma (sangre) – Ion sodio; concentración de cantidad de sustancia igual a 143 mmol/l en una persona determinada en un instante dado”.

NOTA 5 Una magnitud, tal como se define aquí, es una magnitud escalar. Sin embargo, un vector o un tensor, cuyas componentes sean magnitudes, también se considera como una magnitud.

NOTA 6 El concepto de “magnitud” puede dividirse, de forma genérica, en “magnitud física”, “magnitud química” y “magnitud biológica”, o bien en magnitud de base y magnitud derivada.

Unidad de medida

Magnitud escalar real, definida y adoptada por convención, con la que se puede comparar cualquier otra magnitud de la misma naturaleza para expresar la razón entre ambas mediante un número.

NOTA 1 Las unidades se expresan mediante nombres y símbolos, asignados por convención.

NOTA 2 Las unidades de las magnitudes que tienen la misma dimensión, pueden designarse por el mismo nombre y el mismo símbolo, aunque no sean de la misma naturaleza. Por ejemplo, se emplea el nombre "joule por kelvin" y el símbolo J/K para designar a la vez una unidad de capacidad térmica y una unidad de entropía, aunque estas magnitudes no sean consideradas en general de la misma naturaleza. Sin embargo, en ciertos casos, se utilizan nombres especiales exclusivamente para magnitudes de una naturaleza específica. Por ejemplo la unidad "segundo a la potencia menos uno" (1/s) se denomina hertz (Hz) para las frecuencias y becquerel (Bq) para las actividades de radio nucleídos.

NOTA 3 Las unidades de las magnitudes de dimensión uno son números. En ciertos casos se les da nombres especiales; por ejemplo radián, estereorradián y decibel, o se expresan mediante cocientes como el milimol por mol, igual a 10^{-3} , o el microgramo por kilogramo, igual a 10^{-9} .

NOTA 4 Para una magnitud dada, el nombre abreviado "unidad" se combina frecuentemente con el nombre de la magnitud, por ejemplo "unidad de masa".

Principio de Medición

Fenómeno que sirve como base de una medición.

EJEMPLO 1 El efecto termoeléctrico aplicado a la medición de temperatura.

EJEMPLO 2 La absorción de energía aplicada a la medición de la concentración de cantidad de sustancia.

EJEMPLO 3 La disminución de la concentración de glucosa en la sangre de un conejo en ayunas, aplicada a la medición de la concentración de insulina en una preparación.

NOTA El fenómeno puede ser de naturaleza física, química o biológica.

Método de Medición

Descripción genérica de la secuencia lógica de operaciones utilizadas en una medición.

NOTA Los métodos de medición pueden clasificarse de varias maneras como:

- Método de sustitución,
- Método diferencial, y
- Método de cero;
- o
- Método directo, y
- Método indirecto.

Procedimiento de Medición

Descripción detallada de una medición conforme a uno o más principios de medición y a un método de medición dado, basado en un modelo de medición y que incluye los cálculos necesarios para obtener un resultado de medición.

NOTA 1 Un procedimiento de medición se documenta habitualmente con suficiente detalle para que un operador pueda realizar una medición.

NOTA 2 Un procedimiento de medición puede incluir un enunciado referido a una incertidumbre de medición objetivo.

NOTA 3 El procedimiento de medición a veces se denomina standard operating procedure (SOP) en inglés, o mode opératoire de mesure en francés.

Resultado de Medición

Conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mensurando, acompañados de cualquier otra información relevante disponible.

NOTA 1 Un resultado de medición contiene generalmente información relevante sobre el conjunto de valores de una magnitud de modo que algunos de ellos pueden ser más representativos del mensurando que otros. Esto puede expresarse como una función de densidad de probabilidad (FDP).

NOTA 2 El resultado de una medición se expresa generalmente como un valor medido único y una incertidumbre de medición. Si la incertidumbre de medición se considera despreciable para un determinado fin, el resultado de medición puede expresarse como un único valor medido de la magnitud. En muchos campos ésta es la forma habitual de expresar el resultado de medición.

NOTA 3 En la bibliografía tradicional y en la edición precedente del VIM, el término resultado de medición estaba definido como un valor atribuido al mensurando y podía entenderse como una indicación, un resultado no corregido o un resultado corregido, según el contexto.

Exactitud de Medición

Grado de concordancia entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando.

NOTA 1 El concepto “exactitud de medición” no es una magnitud y no se expresa numéricamente. Se dice que una medición es más exacta cuanto más pequeño es el error de medición.

NOTA 2 El término “exactitud de medición” no debe utilizarse en lugar de “veracidad de medición”, al igual que el término “precisión de medición” tampoco debe utilizarse en lugar de “exactitud de medición”, ya que este último término incluye ambos conceptos.

NOTA 3 La exactitud de medición se interpreta a veces como el grado de concordancia entre los valores medidos atribuidos al mensurando.

Veracidad de Medición

Grado de concordancia entre la media de un número infinito de valores medidos repetidos y un valor de referencia.

NOTA 1 La veracidad de medición no es una magnitud y no puede expresarse numéricamente, aunque la norma ISO 5725 especifica formas de expresar dicho grado de concordancia.

NOTA 2 La veracidad de medición está inversamente relacionada con el error sistemático, pero no está relacionada con el error aleatorio.

NOTA 3 No debe utilizarse el término “exactitud de medición” en lugar de “veracidad de medición” y viceversa.

Precisión de Medición

Grado de concordancia entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas.

NOTA 1 Es habitual que la precisión de una medición se exprese numéricamente mediante medidas de dispersión tales como la

desviación estándar, la varianza o el coeficiente de variación bajo las condiciones especificadas.

NOTA 2 Las “condiciones especificadas” pueden ser, por ejemplo, condiciones de repetibilidad, condiciones de precisión intermedia, o condiciones de reproducibilidad.

NOTA 3 La precisión se utiliza para definir la repetibilidad de medición, la precisión intermedia y la reproducibilidad.

NOTA 4 Algunas veces, “precisión de medición” se utiliza, erróneamente, en lugar de “exactitud de medición”.

Error Sistemático de Medición

Componente del error de medición que, en mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible.

NOTA 1 El valor de referencia para un error sistemático es un valor verdadero, un valor medido de un patrón cuya incertidumbre de medición es despreciable, o un valor convencional.

NOTA 2 El error sistemático y sus causas pueden ser conocidas o no. Para compensar un error sistemático conocido puede aplicarse una corrección.

NOTA 3 El error sistemático es igual al error de medición menos el error aleatorio.

Error Aleatorio de Medición

Componente del error de medición que, en mediciones repetidas, varía de manera impredecible.

NOTA 1 El valor de referencia para un error aleatorio es la media que se obtendría de un número infinito de mediciones repetidas del mismo mensurando.

NOTA 2 Los errores aleatorios de un conjunto de mediciones repetidas forman una distribución que puede representarse por su esperanza matemática, generalmente asumida como nula, y por su varianza.

NOTA 3 El error aleatorio es igual al error de medición menos el error sistemático.

Repetibilidad de Medición

Precisión de medición bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad.

Reproducibilidad de Medición

Precisión de medición bajo un conjunto de condiciones de reproducibilidad.

NOTA En las normas ISO 5725-1:1994 e ISO5725-2:1994 se dan los términos estadísticos pertinentes.

Instrumento de Medición

Dispositivo utilizado para realizar mediciones, solo o asociado a uno o varios dispositivos suplementarios.

NOTA 1 Un instrumento de medición que puede utilizarse individualmente es un sistema de medición.

NOTA 2 Un instrumento de medición puede ser un instrumento indicador o una medida materializada.

Sistema de Medición

Conjunto de uno o más instrumentos de medición y, frecuentemente, otros dispositivos, incluyendo reactivos y suministros, ensamblados y adaptados para proporcionar valores medidos dentro de intervalos especificados, para magnitudes de naturalezas dadas.

NOTA Un sistema de medición puede estar formado por un único instrumento de medición.

Medida Materializada

Instrumento de medición que reproduce o proporciona de manera permanente durante su uso, magnitudes de una o varias naturalezas, cada una de ellas con un valor asignado.

EJEMPLOS Pesa patrón, medida de volumen
(proporcionando uno o más valores, con o sin escala de

valores), resistencia eléctrica patrón, regla graduada, bloque patrón, generador de señales patrón, material de referencia certificado.

NOTA 1 La indicación de una medida materializada es su valor asignado.

NOTA 2 Una medida materializada puede ser un patrón.

Valor Nominal

Valor redondeado o aproximado de una magnitud característica de un instrumento o sistema de medición, que sirve de guía para su utilización apropiada.

EJEMPLO 1 El valor 100 Ω marcado como el valor nominal sobre una resistencia patrón.

EJEMPLO 2 El valor 1000 ml marcado como el valor nominal con un trazo sobre un recipiente graduado.

EJEMPLO 3 El valor 0,1 mol/L como el valor nominal de concentración de cantidad de sustancia de una solución de ácido clorhídrico, HCl.

EJEMPLO 4 El valor -20 °C como la máxima temperatura Celsius de almacenamiento.

NOTA El término “valor nominal” no debería confundirse con “valor de una propiedad cualitativa”.

Clase de Exactitud

Clase de instrumentos o sistemas de medición que satisfacen requisitos metrológicos determinados destinados a mantener los errores de medición o las incertidumbres instrumentales dentro de límites especificados, bajo condiciones de funcionamiento dadas.

NOTA 1 Una clase de exactitud habitualmente se indica mediante un número o un símbolo adoptado por convención.

NOTA 2 El concepto de clase de exactitud se aplica a las medidas materializadas.

Patrón de Medición

Realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medición asociada, tomada como referencia.

EJEMPLO 1 Patrón de masa de 1 kg, con una incertidumbre estándar asociada de 3 mg.

EJEMPLO 2 Resistencia patrón de 100 Ω , con una incertidumbre estándar asociada de 1 Ω .

EJEMPLO 3 Patrón de frecuencia de cesio, con una incertidumbre estándar relativa asociada de 2×10^{-15} .

EJEMPLO 4 Electrodo de referencia de hidrógeno, con un valor asignado de 7,072 y una incertidumbre estándar asociada de 0,006.

EJEMPLO 5 Conjunto de soluciones de referencia, de cortisol en suero humano, que tienen un valor certificado con una incertidumbre de medición para cada solución.

EJEMPLO 6 Material de referencia con valores e incertidumbres de medición asociadas, para la concentración de masa de diez proteínas diferentes.

NOTA 1 La “realización de la definición de una magnitud dada” puede establecerse mediante un sistema de medición, una medida materializada o un material de referencia.

NOTA 2 Un patrón se utiliza frecuentemente como referencia para obtener valores medido se incertidumbres de medición asociadas para otras magnitudes de la misma naturaleza, estableciendo así la trazabilidad metrológica, mediante la calibración de otros patrones, instrumentos o sistemas de medición.

NOTA 3 El término “realización” se emplea aquí en su sentido más general. Se refiere a tres procedimientos de realización. El primero, la realización en stricto sensu, es la realización física de la unidad a partir de su definición. El segundo, denominado “reproducción”, consiste, no en realizar la unidad a partir de su definición, sino en construir un patrón altamente reproducible basado en un fenómeno físico, por ejemplo el empleo de láseres estabilizados en frecuencia para construir un patrón del metro, el empleo del efecto Josephson para el volt o el efecto Hall cuántico para el ohm. El tercer

procedimiento consiste en adoptar una medida materializada como patrón. Es el caso del patrón de 1 kg.

NOTA 4 La incertidumbre estándar asociada a un patrón es siempre una componente de la incertidumbre estándar combinada (véase la Guía ISO/IEC 98-3:2008, 2.3.4) de un resultado de medición obtenido utilizando el patrón. Esta componente suele ser pequeña comparada con otras componentes de la incertidumbre estándar combinada.

NOTA 5 El valor de la magnitud y de su incertidumbre de medición deben determinarse en el momento en que se utiliza el patrón.

NOTA 6 Varias magnitudes de la misma naturaleza o de naturalezas diferentes pueden realizarse mediante un único dispositivo, denominado también patrón.

NOTA 7 En el idioma inglés, algunas veces se utiliza la palabra “embodiment” (materialización) en vez de “realization” (realización).

NOTA 8 En ciencia y tecnología, el vocablo inglés “standard” se usa con dos significados distintos: como una norma, especificación, recomendación técnica o documento escrito similar (en el idioma francés “norme”) y como un patrón de medición (en el idioma francés “étalon”). Este vocabulario se refiere únicamente al segundo significado.

NOTA 9 El término “patrón” se utiliza a veces para designar otras herramientas metrológicas, por ejemplo un “programa de medición patrón”.

Patrón de Medición de Referencia

Patrón designado para la calibración de otros patrones de magnitudes de la misma naturaleza, en una organización o lugar dado.

ANEXO 2: FÓRMULA REVISADA PARA LA DENSIDAD DEL AIRE HÚMEDO (CIPM-2007)

La ecuación para la densidad del aire húmedo tiene la siguiente forma [18]:

$$\rho_a = \frac{pM_a}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad A2.1$$

Donde:

- p : Presión(Pa)
- M_a : La masa molar de aire seco.
- Z : Factor de compresibilidad.
- R : Constante molar de los gases ($8,314472 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$)
- T : Temperatura termodinámica (K)
- M_v : Masa molar del agua ($0,01801528 \text{ kg mol}^{-1}$).
- x_v : Fracción molar del vapor de agua.

Si la medida de la fracción molar de dióxido de carbono, x_{CO_2} , está disponible, entonces debería usarse para mejorar la estimación de la masa molar de aire seco:

$$M_a = [28,96546 + 12,011 (x_{CO_2} - 0,0004)] \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1} \quad A2.2$$

Si no se puede medir, puede asumirse un valor histórico de 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ para la fracción molar de dióxido de carbono en aire seco, para lo cual también se ha tomado en cuenta su contribución a la incertidumbre de la medida, ver tabla 1 de [18].

Por lo tanto, la masa molar de aire seco para nuestro cálculo de la densidad del aire es:

$$M_a = 28,96546 \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1} \quad A2.3$$

La fracción molar de vapor de agua, se calcula a partir de la presión de saturación de vapor (p_{sv}). Como el aire húmedo no se comporta como un gas parcial, es necesario introducir un factor de corrección f (factor de fugacidad) que depende de la temperatura y de la presión. En el apéndice A.1 de [18], nos muestra el cálculo de x_v :

$$x_v = hf(p, t) \frac{p_{sv}(t)}{p} \quad A2.4$$

Dónde:

- h : Humedad relativa.

- $f(p, t)$: Factor de fugacidad.

$$f(p, t) = \alpha + \beta p + \gamma t^2 \quad A2.5$$

$$\alpha = 1,00062$$

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

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

- $p_{sv}(t)$: Presión de vapor en saturación (Pa).

$$p_{sv}(t) = 1 \text{Pa} \times \exp\left(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T}\right) \quad A2.6$$

$$A = 1,2378847 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$$

$$B = -1,9121316 \times 10^{-2} \text{K}^{-1}$$

$$C = 33,93711047$$

$$D = -6,3431645 \times 10^3 \text{ K}$$

- p : Presión (Pa).
- t : Temperatura (°C).
- T : Temperatura (K).

Por último, para determinar la densidad del aire húmedo se ha calculado el factor de compresibilidad con la ecuación dada en el apéndice A.2 de [18]:

$$Z = 1 - \frac{p}{T} [a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t) x_v + (c_0 + c_1 t) x_v^2] + \frac{p^2}{T^2} (d + e x_v^2) \quad A2.7$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dónde:

- p : Presión (Pa).
- t : Temperatura ($^{\circ}\text{C}$).
- T : Temperatura (K).
- x_v : Fracción molar del vapor de agua.

Finalmente, reemplazando las ecuaciones A2.3, A2.4, A2.5, A2.6 y A2.7 en la ecuación A2.1 podemos hallar la densidad del aire.