UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
FACULTAD DE INFORMATICA
DEPARTAMENTO DE MATEMATICA

PROCEDIMIETO DE AFORO Y CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE EN TANQUES HORIZONTALES DE CABEZAS PLANAS, INCLINADOS y CON CENTROS DE MEDICION DESPLAZADOS

Tesis en adopción del grado científico de
Master en Matemática Aplicada

AUTOR: MSc. Vladimir Pacheco González
TUTOR: Dr.C. José I. Franco Fernández

Cursos 2006-2008

Dediacada a:

Mi familia, por su apoyo permanente en mi vida, a mis amigos rusos, que estudiaron junto a mí en la universidad Lomonosov de Moscú, por no perder el sentido de la amistad en el tiempo y la distancia y a Roxana por su significado especial para mi, como fuente inspiradora y colaboradora de esta tarea

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos aquellos que me han brindado su ayuda para que culminara el presente trabajo, en especial:

A mi querida madre en esta etapa tan difícil de la vida en nuestro hogar por su respaldo total

A José I. Franco Fernández, por los conocimientos transmitidos y la confianza en mi persona;

A René Treto González, por compartir sus experiencias y conocimientos, por su apoyo e interés en el desarrollo del trabajo;

A Rubén de León Rodríguez, por compartir sus conocimientos, su rigor profesional, su permanente labor educativa, algo muy distintivo para estos tiempos y por su consagración al trabajo;

A Medinilla por ser inspirador en la recta final del trabajo y permitir que la tarea práctica y de validación se llevara a cabo;

A los técnicos del laboratorio de metrología de la ONN en Cienfuegos, Yoyo y Yoel;

A las técnicas de la biblioteca de la Universidad de Cienfuegos;

A las muchachitas de ETECSA por su cooperación y por ser alumnas ejemplares

Y muy especiales a los profesores del departamento de Matemática de la Universidad de Cienfuegos

RESUMEN

La inserción de Cuba en los mecanismos internacionales de comercio, la necesidad de supervivir y desarrollarnos y ser competitivos en el orden económico que tenemos en el mundo actualmente, la responsabilidad del gobierno con el pueblo en la elevación de su nivel de vida, conllevan a que el mejoramiento de la calidad de nuestras producciones y servicios sea una tarea de primer orden. Para nadie es un secreto que muchos de los procesos vinculados a las actividades de producción y servicio pasan por alguna medición en el de cursar de su desarrollo y que muchas veces estas mediciones conllevan a la toma de importantes decisiones.

Es una premisa entonces que la calidad de las mediciones tiene que estar asegurada (aseguramiento metrológico) y para ello los equipos e instrumentos que intervienen en ella deben estar correctamente calibrados y con toda la información acerca de la calidad de este proceso, disponible.

Es útil señalar que el país ha identificado al ahorro y control de los recursos energéticos como una de las fuentes de ingresos más alta de que puede disponer el país en la actualidad

El presente trabajo tiene como propósito general, llevar a la práctica los conocimientos más generales que en materia de estimación de Incertidumbre en las calibraciones se tienen; para con ello calcular la correspondiente a las calibraciones de recipientes horizontales de cabezas planas con grado de inclinación significativo y con el centro de medición desplazado. Se identifican en cada uno de los pasos de este proceso, las fuentes principales de incertidumbre y se analiza si el resultado al cual se arribó, permite insertar la nomenclatura en la cadena de trazabilidad correspondiente.

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del uso del método geométrico de aforo de recipientes para el caso que nos ocupa, cuando no se dispone de los recursos para ser llevado a cabo el aforo por método volumétrico (mucho mas exacto), o simplemente la accesibilidad al recipiente en su lugar de uso solo permite mediciones geométricas del mismo y además que el laboratorio de calibración que ejecute el procedimiento descrito podrá insertarse en la cadena de trazabilidad.

El presente trabajo de tesis está compuesto por un resumen inicial, una introducción y tres capítulos, en el último de los cuales se analizan los resultados; conclusiones y

recomendaciones y un grupo de anexos. El capítulo I, que recoge el marco teórico, se refiere al estado actual del arte en la estimación de la incertidumbre, haciendo especial énfasis en las calibraciones de instrumentos de medición y la determinación de las fuentes de incertidumbre en las mismas, así como la manera de estimarla y analizarla. El capítulo II describe mediante diagramas el algoritmo de cálculo elaborado y algunas consideraciones de interés sobre el mismo, específicamente relacionadas con la determinación de los parámetros metrológicos de campo, así como algunas líneas donde se describe el contenido de un procedimiento para la calibración y estimación la incertidumbre respectivamente. El capítulo III, detalla la obtención de las fórmulas para calcular la incertidumbre, para la obtención de un valor final, que permita demostrar la trazabilidad de las mediciones. Además se hace un análisis de los datos disponibles de calibraciones, durante los últimos 5 años en la provincia de Cienfuegos

... La batalla de ideas se basa en el dominio de los conocimientos de avanzada ...
Fidel Castro

... El socialismo, además de justicia, es eficiencia y calidad...
Carlos Lage

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL III

INDICE DE ACRONIMOS V

INTRODUCCION 1

CAPITULO I : ESTADO ACTUAL DEL ARTE EN EL ANALISIS DE LA INCERTIDUMBRE DE LAS MEDICIONES 4

1.1 Introducción 4

1.2 Términos y definiciones fundamentales relacionados con la incertidumbre de las mediciones en la calibración de instrumentos de medición 4

1.3 Trazabilidad de la medición , como elemento fundamental en la garantía de las mediciones 11

1.3.1 Trazabilidad metrológica nacional 11

1.3.2 La trazabilidad metrológica en Cuba 12

1.3.3 Política de Trazabilidad de la ONARC 13

1.4 Incertidumbre de la medición, como parámetro cuantitativo de la trazabilidad 15

1.4.1 Algunos puntos de vistas en la teoría de la incertidumbre de las mediciones 15

1.4.2 Error e incertidumbre de la medición 19

1.4.3 Estimación de la incertidumbre combinada 24

1.4.4 ONARC. Política de incertidumbre de las mediciones 25

1.4.5 Incertidumbre de medición e intervalo de error tolerado 27

Conclusiones capítulo I 28

CAPITULO II PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION PARA RECIPIENTES INCLINADOS, Y PARA LA ESTIMACION DE LA INCERTIDUMBRE DE LAS CALIBRACIONES 29

2.1 Para la calibración de recipientes inclinados 29

2.1.1 El recipiente horizontal de cabezas planas con grado de inclinación y centro de medición desplazado 29

2.1.2 Esquema general del RHCP inclinado 30

2.1.3 Determinación de las capacidades del recipiente 32

2.1.4 Primera etapa 33

2.1.5 Segunda etapa 34

2.1.6 Tercera etapa 37

2.1.7 Cuarta etapa 39

2.1.8 Validación de fórmulas 43
2.1.9 Determinación de los datos de campo 43
2.2 Evaluación y expresión de la incertidumbre del resultado de la medición 43
Conclusiones capítulo II 48
CAPITULO III ESTIMACION DEL VALOR DE LA INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACION DE RECIPIENTES 49
3.1 Estimación de la Incertidumbre en la calibración de Recipiente inclinado con boca de medición desplazada del centro 49
3.2 Determinación de la incertidumbre combinada y expandida 48
3.3 Análisis y descripción de los resultados 52
3.3.1 Descripción del anexo CD. Resultados prácticos 53
Conclusiones capítulo III 56
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 57
BIBLIOGRAFIA 58
ANEXOS 63

INDICE DE ACRONIMOS

SENAMET	Servicio Nacional de Metrología
ONARC	Órgano Nacional de Acreditación de la República de Cuba
VIM	Vocabulario internacional de Metrología
ISO	International Organization for Standardization
OIML	Organización Internacional de Metrología Legal
OIMLR	Organización Internacional de Metrología Legal. Recomendación
INM	Institutos Nacionales de Metrología
INIMET	Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología
BIPM	Buró Internacional de Pesas y Medidas
VNIIM	Instituto Nacional de Metrología de China
PTB	Instituto Nacional de Metrología de Alemania
CTM	Centros territoriales de Metrología
GUM	Guide to the expression of Uncertainty in Measurement. Published by BIPM, IEC, ISO, OIML and IUPAC
NIST	National Institute of Standards and Technology
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics
IEC	International Electrotechnical Committee
SI	Sistema Internacional de Unidades
NC	Norma Cubana
RHCP	Recipientes Horizontales de Cabezas Planas

INTRODUCCION

El Decreto Ley 182 de Normalización y calidad [1], establece en su artículo 34 que: Las entidades que realizan actividades de calibración de instrumentos de medición cuyo uso tiene relación directa con la salud y la seguridad de las personas o el comercio; tienen que estar acreditadas. Estar acreditados significa que deben ser cumplidos obligatoriamente los requisitos técnicos establecidos en la norma NC-ISO/IEC 17025: 2000 [2]

La mencionada norma establece que:

- Un laboratorio de calibración, debe tener procedimientos para todas sus calibraciones
- Y debe aplicar un procedimiento para estimar la incertidumbre de la medición para todas las calibraciones.

En Cuba los combustibles y otros líquidos importantes se almacenan muchas veces en tanques horizontales de cabezas planas. Para la calibración (aforo) de estos recipientes existen normas cubanas [3] e internacionales [4], [5]. En las mencionadas normas internacionales y otras se recomienda que si estos tanques están inclinados y la relación altura de inclinación altura de tanque es menor que 0.012, se puede no tener en cuenta la misma en el proceso de calibración. Para los recipientes que se usan tanto en operaciones de control (procesos), como en operaciones críticas y cuya inclinación exceda el valor referido, y la medición del contenido de líquido se ejecute en el centro del mismo; existen en las normas tablas de corrección.

En Cuba los recipientes horizontales por lo general están inclinados mucho más de lo permitido debido a:

- Error en el montaje
- Facilidades para la limpieza
- Escurrimiento del contenido por necesidad

Otra peculiaridad importante para el caso cubano es que el lugar de medición de los recipientes muchas veces está desplazado del centro por diseño constructivo de origen,

(los tanques de fabricación soviética por ejemplo), también existen modificaciones en los tanques por problemas de seguridad económica.

Si las mediciones del líquido se ejecutan fuera del centro del recipiente, procedimientos alternativos son utilizados [6], a los cuales no se ha tenido acceso, aunque si es conocido que los mismos no poseen la estimación de la incertidumbre de la medición pues este es un término actual y el cálculo se realiza de forma individual de acuerdo a las condiciones concretas de medición en cada caso.

La situación problémica descrita desemboca en el problema científico siguiente: ¿Es posible diseñar un algoritmo para la calibración de recipientes horizontales con un grado de inclinación notable, con el centro de medición desplazado y que la incertidumbre cumpla con los requerimientos establecidos?

Hipótesis: El empleo de un algoritmo de cálculo para la Calibración de recipientes inclinados y centro de medición desplazado permite aforar los recipientes con un nivel de incertidumbre, que hace trazable sus resultados en el esquema nacional de trazabilidad.

Objetivo General: Analizar los documentos internacionales sobre calibración de recipientes y estimación de incertidumbre de calibraciones, y desarrollar un algoritmo para el aforo de recipientes horizontales con un determinado grado de inclinación y con su centro de medición desplazado y que la incertidumbre del resultado permita insertar la medición en la cadena de trazabilidad nacional

Objetivos Específicos:

1 Identificar los elementos fundamentales de la ley de propagación de la incertidumbre como base científica fundamental en el cálculo de la incertidumbre combinada

2. Identificar las principales fuentes de incertidumbre en la calibración de los recipientes horizontales de cabezas planas de almacenamiento de líquidos

3 Aplicar un esquema de cálculo para la determinación de la incertidumbre en la calibración de los recipientes

Tareas de Investigación

- Analizar los distintos enfoques que en la literatura especializada se dan sobre la estimación de la incertidumbre, haciendo un especial énfasis en la que trata el tema desde el punto de vista metrológico.
- Investigar las experiencias prácticas que sobre el tema se tiene en los laboratorios de calibración del país y en otros partes del mundo en la magnitud de Volumen
- Valorar que características particulares posee un tanque inclinado y su algoritmo de aforo, que provocan la individualización de la estimación de la incertidumbre.
- Establecer de manera general las fuentes de incertidumbre, con los cálculos pertinentes
- Sistematizar las tareas realizadas mediante la escritura de un procedimiento al efecto

El presente estudio correlacional se ha desarrollado a través de una combinación de diseño no experimental transversal y diseño experimental. El diseño no experimental permite después de estudiada la práctica nacional e internacional, establecer el algoritmo de cálculo de capacidades parciales en la calibración de recipientes inclinados y las fuentes de incertidumbre, teniendo en cuenta la instrumentación que se posee en Cuba, para después ser analizadas y modificadas en el estudio experimental y lograr obtener un valor de incertidumbre que permita corroborar o negar la hipótesis planteada

El trabajo posee **novedad práctica en Cuba**

Desde el punto de vista práctico se dispondrá de un algoritmo de cálculo para el aforo de RHCP, inclinados, con el centro de medición desplazado, donde la altura de la varilla o cinta de medición del nivel del líquido en el recipiente, siempre cae en el fondo del mismo, a los cuales no se ha tenido acceso y con su incertidumbre determinada.

La **justificación del la investigación** está dada por la necesidad de, disponer de un algoritmo de medición geométrica para los tanques mencionados, donde la opción volumétrica es mas complicada técnicamente y de un alto costo con relación a la geométrica y que a su vez el mismo permita realizar un estudio de todos los aforos realizados, donde siempre se asume que el tanque es horizontal por declaración del cliente.

CAPITULO I : ESTADO ACTUAL DEL ARTE EN EL ANALISIS DE LA INCERTIDUMBRE DE LAS MEDICIONES

1.1 Introducción

La amplia búsqueda realizada ha permitido el desarrollo del marco teórico de la presente investigación, cuyo hilo conductor se presenta en la figura 1.1

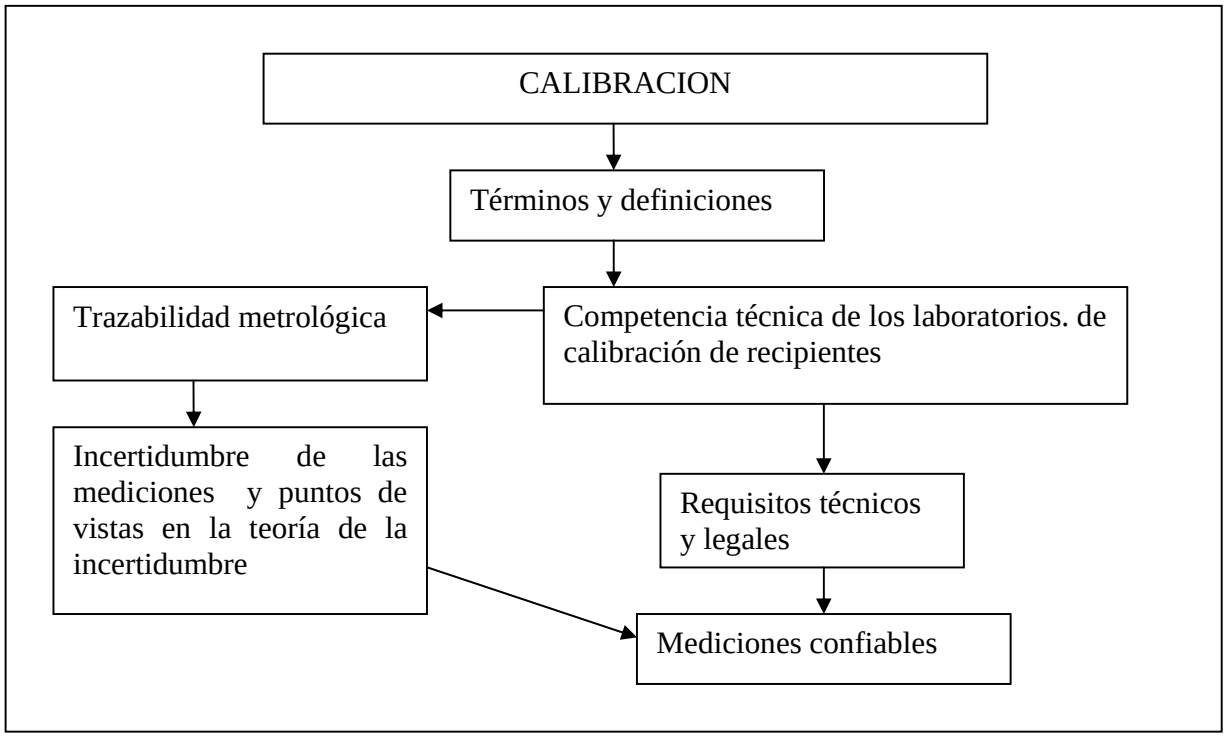


Figura 1.1 Diagrama del hilo conductor del análisis bibliográfico

En el mismo se describe con amplitud todo lo relacionado con el concepto de trazabilidad metrológica, y como el concepto de incertidumbre de las mediciones le proporciona un carácter cuantitativo a la misma.

Paralelamente durante el análisis de ambos conceptos se describe la importancia de la claridad que se debe tener en los mismos para que una medición sea confiable y que requisitos técnicos y legales vinculados al tema se deben cumplir para alcanzar ese grado de confiabilidad

1.2 Términos y definiciones fundamentales relacionados con la incertidumbre de las mediciones en la calibración de instrumentos de medición

A continuación se presentan algunos de los conceptos y términos más necesarios utilizados en el presente trabajo y que facilitan su mejor comprensión. Estos conceptos son tomados en su mayoría del Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) [7] y se agregan algunos

comentarios donde resulte oportuno. Otros conceptos pueden ser consultados en la literatura referenciada. También se consultaron normas ISO y OIML.

Calibración [VIM 6.11] [7]

Conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones especificadas, la relación entre valores de magnitudes indicadas por un instrumento o sistema de medición, o valores representados por una medida materializada o un material de referencia y los correspondientes valores reportados por patrones.

NOTAS:

1 El resultado de la calibración permite tanto la asignación de valores a las indicaciones de la magnitud a medir como la determinación de las correcciones con respecto a las indicaciones

2 Una calibración puede determinar otras propiedades metrológicas , tal como el efecto de magnitudes influyentes

3 El resultado de una calibración puede ser registrado en un documento frecuentemente llamado certificado de calibración o informe de calibración

Acreditación[1]**:**

Procedimiento mediante el cual un organismo autorizado reconoce formalmente que otro organismo o persona es competente para realizar tareas específicas.

Magnitud (medible), [VIM 1.1] [7]

Atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que puede ser identificado cualitativamente y determinado cuantitativamente. Magnitudes en sentido general: longitud, tiempo, masa, temperatura, resistencia eléctrica, concentración de cantidad de sustancia; magnitudes particulares: longitud de una barra en particular, resistencia eléctrica de un alambre etc

Valor (de una magnitud) [VIM 1.18] [7]

Cantidad de una magnitud específica generalmente expresada como una unidad de medida multiplicada por un número. Ejemplo,. longitud de una barra 5,34 m ó 534 cm

Valor verdadero (de una magnitud) [VIM 1.19] [7]

Valor consistente con la definición de una magnitud dada. Este es un valor que pudiera ser obtenido por una medición perfecta. Los valores verdaderos son por naturaleza indeterminados.

Valor verdadero convencional (de una magnitud) [VIM 1.20] [7]

Valor atribuido a una magnitud particular y aceptado, algunas veces por convenio, que tiene una incertidumbre apropiada para un propósito dado. Ejemplo, el valor recomendado por CODATA (1986) para la constante de Avogadro, *NA*: 6,022 136 7 × 10^{23} mol^{-1}.

Medición [VIM 2.1] [7]
Conjunto de operaciones que tienen como objetivo determinar el valor de una magnitud.

Principio de medición [VIM 2.3] [7]
bases científicas de una medición. Ejemplos, el efecto termoeléctrico aplicado a la medición de temperatura; efecto Doppler aplicado a la medición de velocidad etc

Método de medición [VIM 2.4] [7]
Secuencia lógica de operaciones, generalmente descritas, usada en la ejecución de las mediciones.

Procedimiento de medición [VIM 2.5] [7]
conjunto de operaciones, descrita de forma específica, utilizadas en la ejecución de mediciones particulares, de acuerdo a un método dado.
NOTA - El procedimiento de medición es generalmente registrado en un documento que en ocasiones se denomina por sí mismo procedimiento de medición (o un método de medición) y contiene normalmente los detalles suficientes para que un operador sea capaz de realizar una medición sin información adicional.

Magnitud a medir (mensurando) [VIM 2.6] [7]
Magnitud particular sujeta a ser medida. Ejemplo, presión de vapor de agua a 20 °C.
NOTA - La especificación de una magnitud a medir, puede requerir indicaciones relativas a magnitudes, tales como tiempo, temperatura y presión.

Magnitud influyente [VIM 2.7] [7]
Magnitud que no es la magnitud a medir, pero que afecta el resultado de la medición. Ejemplos, temperatura de un micrómetro utilizado para medir longitud; frecuencia en la medición de la amplitud de la diferencia de potencial eléctrico de corriente alterna; etc
NOTA: Se entiende que la definición de magnitud influyente incluye valores asociados con patrones de medición, materiales de referencia, y datos de referencia de los cuales puede depender el resultado de una medición, incluye, también fenómenos tales como fluctuaciones a

corto plazo en instrumentos de medición, y magnitudes como temperatura ambiente, presión barométrica y humedad.

Resultado de una medición [VIM 3.1] [7]
Valor atribuido a una magnitud a medir, obtenido por una medición.
NOTA: La expresión completa del resultado de una medición incluye la información sobre la incertidumbre de la medición.

Resultado no corregido [VIM 3.3] [7]
Resultado de una medición antes de la corrección por el error sistemático

Resultado corregido [VIM 3.4] [7]
Resultado de una medición después de la corrección por el error sistemático

Exactitud de la medición [VIM 3.5] [7]
Grado de concordancia entre el resultado de una medición y un valor verdadero de la magnitud a medir.

Repetibilidad (de resultados de las mediciones) [VIM 3.6] [7]
Grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud a medir llevadas a cabo bajo las mismas condiciones
NOTAS
1 Estas condiciones se denominan condiciones de repetibilidad.
2 Las condiciones de repetibilidad incluyen:
- el mismo procedimiento de medición,
- el mismo observador,
- el mismo instrumento de medición, utilizado bajo las mismas condiciones,
- el mismo lugar,
- la repetición en un corto intervalo.

3 La repetibilidad puede ser expresada cuantitativamente en términos de las características de la dispersión de los resultados.

Reproducibilidad (de los resultados de las mediciones) [VIM 3.7] [7]
Grado de concordancia entre el resultado de mediciones de la misma magnitud a medir, llevadas a cabo bajo distintas condiciones

NOTAS

1 Para que una expresión de la reproducibilidad sea válida es necesario especificar las condiciones que varían.

2 Las distintas condiciones pueden incluir:

- principio de medición,
- método de medición,
- observador,
- instrumento de medición,
- patrón de referencia
- lugar,
- condiciones de uso,
- tiempo.

3 La reproducibilidad puede ser expresada cuantitativamente en términos de las características de la dispersión de los resultados.

4 Aquí se entiende generalmente que los resultados son resultados corregidos.

Desviación estándar experimental [VIM 3.8] [7], [8]

Para una serie de *n* mediciones de la misma magnitud a medir, la magnitud *s* caracteriza la dispersión de los resultados, y se expresa por la fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x} \right)^2}{n - 1}} \qquad \textbf{(1.1)}$$

donde x_i es el resultado de la *i*-ésima medición y $\bar{x}$ es la media aritmética de los *n* resultados considerados.

NOTAS

1 Considerando la serie de *n* valores como una muestra de una distribución, $\bar{x}$ es un estimador sin sesgo de la media μ, y s^2 es un estimador sin sesgo de la varianza σ^2 de esa distribución.

2 La expresión $s/\sqrt{n}$ es un estimador de la desviación estándar de la distribución de $\bar{x}$ y se denomina desviación estándar experimental de la media.

3 La "desviación estándar experimental de la media" en ocasiones es llamada incorrectamente error estándar de la media.

.

Incertidumbre (de la medición) [VIM 3.9] [7], [9]

Parámetro, asociado con el resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que pudieran ser razonablemente atribuidos a la magnitud a medir.

NOTAS

1 El parámetro puede ser, por ejemplo, la desviación estándar (o un múltiplo de ésta), o la semi amplitud de un intervalo con un nivel de confianza establecido.

2 La incertidumbre de la medición comprende, en general, muchos componentes. Algunos de ellos pueden ser evaluados a partir de la distribución estadística de los resultados de series de mediciones y pueden ser caracterizados mediante desviaciones estándar experimentales. Los otros componentes, que pueden también ser caracterizados por desviaciones estándar, son evaluados a partir de distribuciones de probabilidad asumidas, basadas en la experiencia u otra información.

3 Se entiende que el resultado de la medición es el mejor estimado del valor de la magnitud a medir y que todos los componentes de la incertidumbre contribuyen a la dispersión, incluyendo aquellos que surgen de los efectos sistemáticos tales como los componentes asociados con las correcciones y los patrones de referencia.

Incertidumbre estándar [9]

Incertidumbre del resultado de una medición expresada como una desviación estándar.

Evaluación (de incertidumbre) Tipo A [9]

Método para evaluar la incertidumbre mediante el análisis estadístico de una serie de observaciones.

Evaluación (de incertidumbre) Tipo B [9]

Método para evaluar la incertidumbre por otro medio que no sea el análisis estadístico de una serie de observaciones.

Incertidumbre estándar combinada [9]

Incertidumbre estándar del resultado de una medición cuando el resultado se obtiene a partir de los valores de algunas otras magnitudes, igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo estos términos las varianzas y covarianzas de estas otras magnitudes ponderadas de acuerdo cómo el resultado de la medición varía con respecto a cambios en estas magnitudes.

Incertidumbre expandida [9]

Cantidad que define un intervalo alrededor de una medición del que se puede esperar que abarque una fracción grande de la distribución de valores que razonablemente pudieran ser atribuidos al mensurando.

NOTAS:

1. La fracción puede considerarse como la probabilidad de cobertura o el nivel de confianza del intervalo.

2. Asociar un nivel específico de confianza con el intervalo definido por la incertidumbre expandida, requiere de suposiciones explícitas o implícitas que tomen en consideración la distribución de probabilidad caracterizada por el resultado de la medición y su incertidumbre estándar combinada. El nivel de confianza que puede ser atribuido a este intervalo puede ser conocido únicamente hasta el punto en el cual tales suposiciones puedan justificarse.

Factor de cobertura [9]

Factor numérico usado como multiplicador de la incertidumbre estándar combinada con el propósito de obtener una incertidumbre expandida.

NOTA: El factor de cobertura, *k*, usualmente toma valores en el intervalo de 2 a 3.

Error (de medición) [VIM 3.10] [7], [10]-[14]

resultado de una medición menos un valor verdadero de la magnitud a medir.

NOTAS

1. Puesto que un valor verdadero no puede ser determinado, en la práctica se usa un valor verdadero convencional (véase VIM 1.19 B.2.3 y 1.20 B.2.4).

2. Cuando es necesario distinguir el "error" del "error relativo", este ultimo es algunas veces llamado error absoluto de la medición. Esto no debería confundirse con el valor absoluto del error el cual es el módulo del error.

Error aleatorio [VIM 3.13] [7], [10]-[14]

resultado de una medición menos la media que pudiera resultar de un número infinito de mediciones de la misma magnitud a medir llevadas a cabo bajo condiciones de repetibilidad

NOTAS

1 El error aleatorio es igual al error menos el error sistemático.

2 Debido a que sólo un número finito de mediciones pueden ser realizadas, es posible determinar sólo un estimado del error aleatorio.

Error sistemático [VIM 3.14] [7], [10]-[14]

media que resultaría de un número infinito de mediciones de la misma magnitud a medir llevadas a cabo bajo condiciones de repetibilidad, menos un valor verdadero de dicha magnitud.

NOTAS

1. El error sistemático es igual al error menos el error aleatorio.

2. Al igual que el valor verdadero, error sistemático y sus causas no pueden ser completamente conocidos.

Puede considerarse frecuentemente que el error del resultado de una medición surge debido a varios efectos sistemáticos y aleatorios que contribuyen con componentes individuales de error al error del resultado.

Corrección [VIM 3.15] [7], [10]-[14]

Valor, sumado algebraicamente al resultado no corregido de una medición, para compensar por el error sistemático.

NOTAS

1. La corrección es igual al error sistemático estimado pero con signo opuesto.
2. Puesto que el error sistemático no puede ser perfectamente conocido, la compensación no puede ser completa.

Factor de corrección [VIM 3.15] [7], [10]-[14]

factor numérico por el cual se multiplica el resultado no corregido de una medición para compensar por el error sistemático.

NOTA Puesto que el error sistemático no puede ser perfectamente conocido, la compensación no puede ser completa.

Trazabilidad metrológica [VIM 6.10] [7], [15]

Propiedad del resultado de una medición obtenida como resultado de una referencia metrológica declarada a través de una cadena ininterrumpida de un sistema de calibración de medición o comparaciones, contribuyendo cada una a la incertidumbre de medición declarada. Es la vía para demostrar que una medición (incluyendo su incertidumbre) es una representación exacta de lo que se está tratando de medir. Un ejemplo sencillo es que el kilogramo de cualquier producto que se compra o vende en un mercado tiene exactamente el mismo peso de otro kilogramo en cualquier parte del mundo y también es el mismo kilogramo en cualquier otra actividad, como por ejemplo nuestro peso.

1.3 Trazabilidad de la medición, como elemento fundamental en la garantía de las mediciones

1.3.1 Trazabilidad metrológica nacional [43]

La trazabilidad en cada país se logra por la calibración de los instrumentos de medición con patrones de medición más exactos y estos últimos se calibran con los patrones nacionales y de

mayor exactitud conservados en los laboratorios de metrología nacionales (INM), en nuestro caso es el INIMET.

Gráficamente puede esquematizarse como se muestra en la figura 1.2

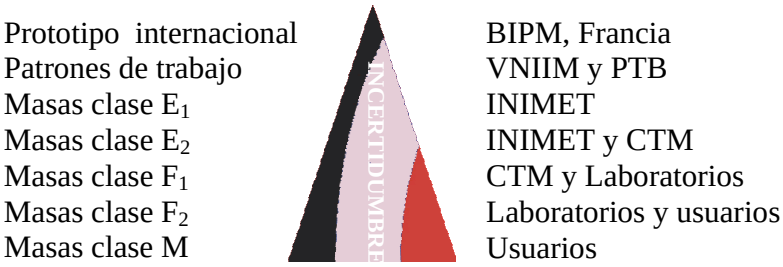


Figura 1.2 Trazabilidad metrológica nacional para las pesas

Este proceso se puede representar en las llamadas cadenas de trazabilidad [VIM 6.10 Nota 2] [7] y esta secuencia se define como jerarquía de calibración. En el caso de la trazabilidad internacional los institutos nacionales de metrología se esfuerzan para asegurar la conformidad internacional respecto a lo patrones nacionales a través de intercomparaciones internacionales, las cuales son organizadas por los órganos regionales de metrología y dirigidos estos y publicados sus resultados por el BIPM.

1.3.2 La trazabilidad metrológica en Cuba [16]

El INM en nuestro país es el INIMET, donde se conservan los patrones nacionales y de mayor exactitud de la mayoría de las magnitudes físicas. Estos patrones son intercomparados con los de otros países o con los órganos regionales y en algunos casos son calibrados en el Instituto Mendeleiev de Rusia y en el PTB de Alemania, garantizando así la trazabilidad metrológica internacional. Los resultados de las intercomparaciones ejecutadas son publicadas y enviadas al órgano regional y al BIPM. Por ejemplo en las 3 intercomparaciones ejecutadas recientemente, los resultados todos han sido satisfactorios y están disponibles a los clientes en el propio INIMNET [44],[45],[46]

Los patrones secundarios pertenecientes a los Centros Territoriales de metrología y otros laboratorios de la industria son calibrados por el INIMET de acuerdo a métodos validados y en las condiciones ambientales requeridas y por especialistas de alta calificación.

Todos estos laboratorios donde se incluye el laboratorio provincial de calibración de Cienfuegos integran el Servicio Nacional de Metrología SENAMET y son los que ejecutan la calibración y verificación de todos los instrumentos de medición que existen en los diferentes procesos en el país, ya sea los que responden a la metrología legal como a la industrial.

Hasta el momento se ha hablado de la trazabilidad metrológica en general, para poder “ver” esquemáticamente la trazabilidad en la magnitud de Volumen y para ganar en mayor claridad se muestra en la figura 1.3, el esquema simplificado de jerarquía, tomado de los documentos de diseño del servicio nacional de metrología, en exposición en cada centro territorial de metrología del país, en este caso del INIMET

1.3.3 Política de Trazabilidad de la ONARC [15],[17],[18]

El ONARC dentro de la facultades que le están conferidas en el Decreto-Ley 182 [1] sobre normalización y calidad, ha acordado la política de trazabilidad de las mediciones y que será destinada a los laboratorios acreditados y en proceso. En ella se establece que los laboratorios acreditados por el ONARC tienen que ser capaces de demostrar que la calibración de los equipos fundamentales, y por tanto que los resultados de calibración o ensayo generados por dichos equipos y que son importantes dentro del alcance de sus acreditaciones, son trazables al SI . El ONARC considera equipo fundamental de los laboratorios de calibración y ensayo los que son necesarios para realizar una calibración o ensayo a partir del alcance de su acreditación e influyen de forma significativa en la incertidumbre de la medición de los resultados de calibración o ensayo. Cuando el concepto de trazabilidad sea importante y posible técnicamente, el ONARC exige que los laboratorios de ensayo acreditados garanticen la trazabilidad de los resultados de las calibraciones y/o ensayos acreditados a:

- un Instituto Nacional de Metrología (Instituto Nacional de Investigaciones en Metrología de Cuba, INIMET, o de otro país) :
- otro laboratorio integrante del Servicio Nacional de Metrología, un laboratorio de calibración acreditado que pueda proveer incertidumbres de medición apropiadas.
- un laboratorio no acreditado oficialmente pero que pueda demostrar su competencia, mediante la participación satisfactoria en ensayos de aptitud por intercomparación entre laboratorios, o por otras vías,
- un material de referencia certificado,
- a un patrón mutuamente acordado, o
- a través de la participación en un programa apropiado de comparaciones entre laboratorios.

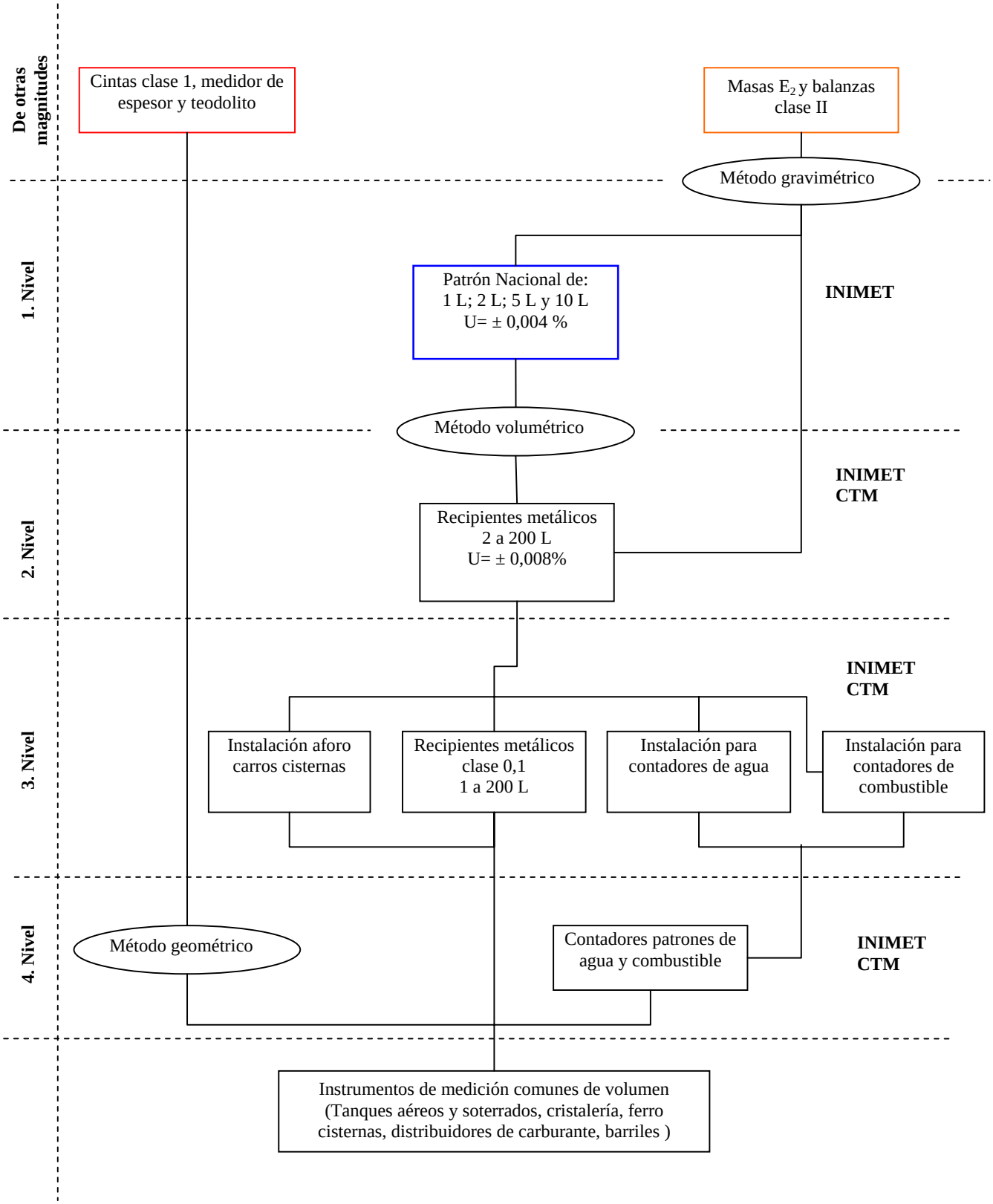


Figura 1.3 Esquema de Jerarquía Nacional de Volumen

Entre las evidencias fundamentales que se exigen para demostrar la trazabilidad , son aceptados los Certificados de Calibración [19], emitidos por los laboratorios que cumplan los requisitos pertinentes establecidos en la norma NC ISO/IEC 17025: 2000 y sus revisiones mas actuales y que entre otros aspectos destaca que los certificados de calibración deben incluir, donde resulte necesario para la interpretación de los resultados de la calibración: la incertidumbre de la medición y/o una declaración de conformidad con una especificación metrológica identificada o con sus apartados y cuando se emite una declaración de conformidad, debe tenerse en cuenta la incertidumbre de la medición. Además este documento destaca que, se permite el establecimiento de una declaración de conformidad indicándose una relación incertidumbre de la medición-error tolerado para el instrumento calibrado**,** ya que las declaraciones de incertidumbre expresadas de esta manera son declaraciones implícitas de incertidumbre.

La ONARC establece también que es posible mostrar otras evidencias de que las mediciones son trazables. Estas evidencias generalmente se logran mediante una declaración que confirma que la calibración realizada se llevó a cabo utilizando patrones cuyos valores son trazables con patrones nacionales, internacionales o por otra vía. En todos los casos será obligatorio señalar la denominación del patrón y el número de serie del mismo u otra identificación inequívoca del patrón utilizado. A partir de lo descrito en los párrafos anteriores, los resultados de ensayos y calibraciones acreditados, reportados por laboratorios que son acreditados por el ONARC y reportados en un certificado de ensayo o calibración, que incluye el logo autorizado del Órgano o que especifique su condición de acreditado, son los que serán reconocidos por el ONARC como que satisfacen los requisitos de la trazabilidad de las mediciones.

1.4 Incertidumbre de la medición, como parámetro cuantitativo de la trazabilidad

1.4.1 Algunos puntos de vistas en la teoría clásica de la incertidumbre de las mediciones

Abernethy y colaboradores [20], [21], [22]

Este punto de vista fue mundialmente empleado en los años 70 por diferentes normas y guías internacionales. Por medio del estimador U_{RSS} (incertidumbre raíz cuadrada de la suma) y U_{ADD} (suma de componentes) de la incertidumbre y para un nivel de confianza del 95% y 99% se obtiene:

$$U_{RSS} = \left[B_f^2 + \left(t_{p,\gamma} Sk_f\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad \textbf{(1.2)}$$

$$U_{ADD} = B_f + t_{p,\gamma} Sk_f \quad \textbf{(1.3)}$$

$$B_f = \left[\sum_{i=1}^{n} \left(\theta_i^2 B_i^2\right)\right]^{\frac{1}{2}} \text{ (Influencias sistemáticas)} \quad \textbf{(1.4a)}$$

$$S_f = \left[\sum_{i=1}^{n} \left(\theta_i^2 Sk_i^2\right)\right]^{\frac{1}{2}} \text{ (Influencias aleatorias)} \quad \textbf{(1.4b)}$$

B_f y Sk_f: Estimador con un 95% de confianza del valor verdadero

$t_{p,\gamma}$: Percentil de la distribución Student con un 95% de confianza y grados de libertad según:

$$\gamma_f = \frac{\left(\theta_i Sk_i\right)^4}{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(\theta_i Sk_i\right)^4 / \gamma_{Si}\right]} \quad \textbf{(1.5)}$$

θ_i: Simplificación para $\frac{\partial}{\partial x}$

Las ecuaciones anteriores son una simplificación de la determinación de la incertidumbre.

Coleman y Steele [23], [24], [25], [26]

Estos autores hacen una extensión de las ideas de Kline y McClintock [26] y bajo los supuestos de que las desviaciones provienen de una distribución normal, entonces la ecuación de la propagación de la incertidumbre sería:

$$U_c^2 = \theta_X^2 S_{Bx}^2 + \theta_Y^2 S_{By}^2 + 2\theta_X \theta_Y S_{Bxy} + \theta_X^2 Sk_X^2 + \theta_Y^2 Sk_Y^2 + 2\theta_X \theta_Y Sk_{XY} \quad \textbf{(1.6)}$$

Con un nivel de confianza del 95% y una ecuación similar a U_{RSS} resulta:

$$U_R^2 = B_R^2 + Sk_R^2 \quad \textbf{(1.7)}$$

$$B_R^2 = \sum_{i=1}^{n} \theta_i^2 B_i^2 + 2\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^{n} \theta_i \theta_k \rho_{Bik} B_i B_k \text{ (Incertidumbre sistemática)} \quad \textbf{(1.8)}$$

y como límite de las desviaciones aleatorias:

$$Sk_R^2 = \sum_{i=1}^{n} \theta_i^2 Sk_i^2 + 2\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^{n} \theta_i \theta_k \rho_{Sk_i, Sk_k} Sk_i Sk_k \quad \textbf{(1.9)}$$

ρ_{Bix} : Factor de correlación entre desv. sistemáticas en x_i, x_k .

ρ_{Sk_i,Sk_k} : Factor de correlación entre las desv. aleatorias en x_i, x_k .

$Sk_i = t_{p,\gamma_i} Sk_{x_i}$ (La incertidumbre aleatoria de la variable x_i) **(1.10)**

t_{p,γ_i} : Percentil de la dist. Student con grados de libertad $\gamma_i = n_i - 1$.

Este enfoque no hace empleo de la fórmula de *Welch-Satterthwait* para la determinación de los grados de libertad. En la práctica esto es similar al anterior punto de vista, pero se diferencia en la determinación de los grados de libertad, en este caso según:

$$\gamma_i = \frac{(Sk_i^2 + S_{Bi}^2)^2}{Sk_i^4 / \gamma_{Si} + S_{Bi}^4 / \gamma_{Bi}} \quad \textbf{(1.11)}$$

γ_{si}: Grados de libertad del estimador de las influencias aleatorias

$$Sk_i, \quad (\gamma_{Si} = n - 1)$$

γ_{Bi}: Grados de libertad del estimador de las influencias sistemáticas S_{Bi}

$$\gamma_{Bi} \approx \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta B_i}{B_i}\right)^{-2} \text{(Recomendación de la ISO)} \quad \textbf{(1.12)}$$

En esta última ecuación la cantidad entre paréntesis, es la incertidumbre relativa para B_i

Los dos enfoques anteriores coinciden para tamaños maestrales grandes, eso es, n_i y γ_i tales que $t_{p,\gamma i}$. puede ser igual a 2 (95% de nivel de confianza), esta argumentación es válida cuando $n_i > 10$ y $v_i > 9$.

Guía ISO [9], [27]

El enfoque que a continuación analizaremos, está basado en el documento de consenso Recomendación INC-1 (1980) [28], que entre otras cosas establece que

1) La incertidumbre en el resultado de una medición consta, generalmente, de varias componentes que pueden ser agrupadas en dos categorías, dependiendo de la manera en que se estime su valor numérico:

   A) aquellas que se evalúan por métodos estadísticos.
   B) aquellas que se evalúan por otros medios.

   No siempre existe una correspondencia simple entre las categorías A y B y la clasificación en incertidumbres “aleatorias” y “sistemáticas” que se usaba anteriormente El término “incertidumbre sistemática” puede ser confuso y debe ser evitado.

   Cualquier informe detallado de la incertidumbre debe constar de una lista completa de las componentes, especificando en cada caso el método usado para la obtención de su valor numérico.

2) Los componentes en la categoría A se caracterizan mediante las varianzas estimadas s_i^2 (o las “desviaciones estándar” estimadas s_i) y el número de grados de libertad ν_i. En caso de ser necesario, debe darse el valor de las covarianzas.

3) Los componentes en la categoría B deben ser caracterizados mediante las cantidades u_j^2, las cuales pueden ser consideradas como aproximaciones a las varianzas correspondientes, cuya existencia se supone. Las cantidades u_j^2 pueden ser tratadas como varianzas, y las cantidades u_i como desviaciones estándar. En caso de ser necesario, las covarianzas deben ser tratadas de la misma manera.

4) La incertidumbre combinada debe ser caracterizada mediante el valor numérico que se obtiene al aplicar el método usual para la combinación de varianzas. La incertidumbre combinada y sus componentes deben expresarse en la forma de "desviaciones estándar".

5) Si en una aplicación particular es necesario que se multiplique la incertidumbre combinada por un factor con la finalidad de obtener una incertidumbre total, el factor multiplicativo debe especificarse siempre.

La guía ISO (BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP y OIML) tiene una diferencia fundamental con los puntos de vistas anteriores la cual consiste en que la incertidumbre estándar u{x) representa los valores de S_{Bi} y Sk_i, y los componentes de la incertidumbre son clasificados según el método de estimación por Método A y B.

El propósito de la clasificación Tipo A y Tipo B es para indicar las dos diferentes maneras de evaluar componentes de incertidumbre y es por conveniencia de discusión solamente; la clasificación no significa que exista alguna diferencia en la naturaleza de los componentes que resultan de cada uno de los dos tipos de evaluación. Ambos tipos de evaluación están basados en **distribuciones de probabilidad** y los componentes de incertidumbre resultantes de cualquier tipo son cuantificados por varianzas y desviaciones estándar.

La varianza estimada u^2 que caracteriza a una componente de incertidumbre obtenida de una evaluación tipo A se calcula mediante series de observaciones repetidas y es la varianza estimada estadística familiar s^2. La desviación estándar estimada *u,* la raíz cuadrada positiva de u^2, es entonces $u = s$ y por conveniencia es llamada algunas veces *incertidumbre estándar* Tipo A. Para una componente de incertidumbre obtenida de una evaluación Tipo B, la varianza estimada u^2 es evaluada mediante el uso de la información disponible, y la desviación estándar estimada *u* es algunas veces llamada *incertidumbre* estándar Tipo B.

Entonces la incertidumbre estándar Tipo A es obtenida de una **función de densidad de probabilidad** deducida de una **distribución de frecuencia** observada, mientras que la incertidumbre estándar Tipo B se obtiene de una función de densidad de probabilidad supuesta basada en el grado de creencia de que un evento pueda ocurrir [a menudo llamada **probabilidad** subjetiva. Ambas aproximaciones emplean interpretaciones de probabilidad reconocidas.

NOTA. Una evaluación Tipo B de una componente de incertidumbre generalmente se basa en una fuente común de información comparativamente contable

1.4.2 Error e incertidumbre de la medición

En esta parte del marco teórico se exponen algunas consideraciones tomadas de la Guía BIPM/ISO Para la expresión de la incertidumbre en las mediciones, 1993 [9] que ilustran el enlace entre el error de la medición y la incertidumbre .

El primer paso para hacer una medición es definir el mensurando, la magnitud que se va a medir; el mensurando no se puede definir mediante un valor sino únicamente mediante una descripción de una magnitud. Un mensurando no puede ser descrito *completamente* sin hacer uso de una cantidad de información infinita. Por lo tanto, al dejar espacio para hacer interpretaciones, una definición incompleta del mensurando introduce una componente de incertidumbre en la incertidumbre del resultado de la medición que puede, o no, ser significativa dependiendo de la exactitud que demande la medición. Idealmente, la magnitud realizada para medición sería totalmente consistente con la definición del mensurando. Sin embargo, frecuentemente no es posible realizar tal magnitud y la medición se lleva a cabo en una magnitud que es una aproximación del mensurando.

El resultado de la medición de la magnitud realizada se corrige por la diferencia entre esa magnitud y el mensurando para predecir cual habría sido el resultado de la medición si la magnitud realizada hubiera cumplido la definición del mensurando. El resultado de la medición de la magnitud realizada se corrige también por todos los efectos sistemáticos significativos conocidos. A pesar de que el resultado corregido final se considera, a veces, como la mejor estimación del valor “verdadero” del mensurando, en realidad el resultado es simplemente la mejor estimación del valor de la magnitud que se pretende medir.
Como un ejemplo, supóngase que el mensurando es el espesor de una determinada lámina de material a una temperatura específica. La lámina se lleva a una temperatura cerca de la especificada y se mide su espesor con un micrómetro. El espesor del material en ese punto y a esa temperatura, bajo la presión aplicada por el micrómetro, es la magnitud realizada. Se determinan la temperatura de el material, en el momento de la medición, y la presión aplicada. El resultado no corregido de la medición de la magnitud realizada se corrige entonces tomando en cuenta la curva de calibración del micrómetro, la diferencia entre la temperatura de la lámina y la temperatura especificada, y la ligera compresión de la lámina por la presión aplicada. Al resultado corregido se le puede llamar la mejor estimación del valor “verdadero”, en donde “verdadero” se refiere al valor de la magnitud que se cree satisface plenamente la definición del mensurando; pero si el micrómetro se hubiera aplicado a alguna parte diferente de la lámina, entonces la magnitud realizada hubiera sido diferente y se tendría un valor “verdadero" diferente. Sin embargo, este valor “verdadero” sería consistente con la definición del mensurando debido a que nunca se especificó que el grosor tendría que ser determinado en algún lugar específico de la lámina. Por lo tanto, en este caso, debido a la definición incompleta del mensurando, el valor “.verdadero” tiene una incertidumbre que puede ser evaluada a partir de mediciones hechas en diferentes lugares de la lámina. Hasta cierto punto, cada mensurando tiene una incertidumbre “intrínseca” que, en principio, puede ser estimada de alguna manera.

Esta es la mínima incertidumbre con la cual se puede determinar un mensurando, y cada medición que alcanza tal incertidumbre puede tomarse como la mejor medición posible del mensurando. Para obtener un valor de la magnitud en cuestión con una menor incertidumbre se requiere que la definición del mensurando sea más completa.
En el ejemplo, la definición del mensurando deja en duda muchos otros aspectos que posiblemente podrían afectar el grosor de la lámina: la presión barométrica, la humedad, el comportamiento de la lámina en un campo gravitacional, la manera como se sostiene, etc.

A pesar de que el mensurando debe definirse a tal detalle que cualquier incertidumbre que provenga de una definición incompleta sea despreciable en comparación con la exactitud de la medición requerida, se debe reconocer que esto no siempre es posible. La definición podría estar incompleta, por ejemplo, por no especificar parámetros cuyos efectos se han supuesto, injustificadamente, despreciables; o podría implicar condiciones que nunca podrán ser plenamente cubiertas y cuya realización imperfecta es difícil de tomar en cuenta. La definición inadecuada del mensurando puede llevar a discrepancias entre los resultados de la misma magnitud llevada a cabo en diferentes laboratorios.
Analicemos ahora el término error. El resultado corregido de una medición no es el valor del mensurando, es decir, existe un error debido a una medición imperfecta de la magnitud realizada por variaciones aleatorias en las observaciones (efectos aleatorios). determinación inadecuada de correcciones por efectos sistemáticos y conocimiento incompleto de ciertos fenómeno, físicos (que son también efectos sistemáticos). Nunca podrán conocerse exactamente ni el valor de la magnitud realizada ni el del mensurando; lo único que podemos conocer son sus valores estimados. En el ejemplo anterior, el grosor medido de la lámina *puede* tener un error, es decir, puede diferir del valor del mensurando (el grosor de la lámina), debido a que cada uno de los siguientes factores pueden combinarse para contribuir con un error desconocido al resultado de la medición:

a) diferencias pequeñas en las lecturas del micrómetro cuando se aplica repetidamente a la misma magnitud realizada
b) calibración imperfecta del micrómetro
c) medición imperfecta de la temperatura y de la presión aplicada
d) conocimiento incompleto de los efectos de temperatura, presión barométrica y humedad en la lámina o en el micrómetro o en ambos.

¿ Incertidumbre?, Mientras que los valores exactos de las contribuciones al error de un resultado de una medición son desconocidos y no se pueden conocer, las *incertidumbres* asociadas con los efectos aleatorios y sistemáticos que dan lugar al error pueden ser evaluadas. Pero, aún si las incertidumbres evaluadas son pequeñas, no existe garantía de que

el error en el resultado de la medición sea pequeño; ya que podría pasarse por alto algún efecto sistemático, en la determinación de una corrección o debido a la falta de conocimiento, por no haberse identificado. Por tanto, la incertidumbre del resultado de una medición no es necesariamente una indicación de la factibilidad de que el resultado de la medición este cerca del valor del mensurando; simplemente implica un estimado de la factibilidad de cercanía con el mejor valor que es consistente con el conocimiento disponible actualmente. Incertidumbre de medición es, por lo tanto, una forma de expresar el hecho de que, para un mensurando y su resultado de medición dados, no hay un solo valor, sino un número infinito de valores dispersos alrededor del resultado que son consistentes con todas las observaciones, datos y conocimientos que se tengan del mundo físico, y que con distintos grados de credibilidad pueden ser atribuidos al mensurando.

Afortunadamente en muchas de las situaciones prácticas de medición no tiene aplicación lo analizado hasta el momento. Algunos ejemplos son: cuando el mensurando está definido adecuadamente; cuando los patrones o instrumentos son calibrados usando patrones de referencia bien conocidos y que son trazables a patrones nacionales; y cuando las incertidumbres de las correcciones de calibración son insignificantes comparadas con las incertidumbres provenientes de efectos aleatorios en las lecturas de instrumentos, o de un limitado número de observaciones. Sin embargo, el conocimiento incompleto de las magnitudes que influyen en la medición y sus efectos, pueden, con frecuencia, contribuir significativamente a la incertidumbre del resultado de una medición. En la figura 1.6 se puede apreciar una representación gráfica de lo descrito hasta el momento [9],[10] y se puede observar además que el error exacto del resultado de una medición por lo general no se conoce y no se puede conocer. Lo único que se puede hacer es estimar tanto los valores de los argumentos, incluyendo las correcciones por los efectos sistemáticos reconocidos, como las correspondientes incertidumbres estándar (desviaciones estándar estimadas), ya sea de distribuciones de probabilidad desconocidas que son muestreadas por medio de observaciones repetidas, o de distribuciones *a priori* o subjetivas basadas en el conjunto de información disponible; posteriormente se calcula el resultado de la medición a partir de los valores de los argumentos y la incertidumbre estándar combinada de ese resultado a partir de las incertidumbres estándar de aquellas, estimaciones. Sólo si existe una sólida base para creer que todo esto ha sido hecho apropiadamente, sin que se hayan pasado por alto efectos sistemáticos significativos, se puede asumir que el resultado de la medición es una estimación contable del valor del mensurando y que su incertidumbre estándar combinada es una medida confiable de su *posible* error.

Notas La corrección para un error es igual al negativo del error estimado. Por lo tanto, en ambas figuras, la flecha que ilustra la corrección por un error es igual en longitud pero apunta en la

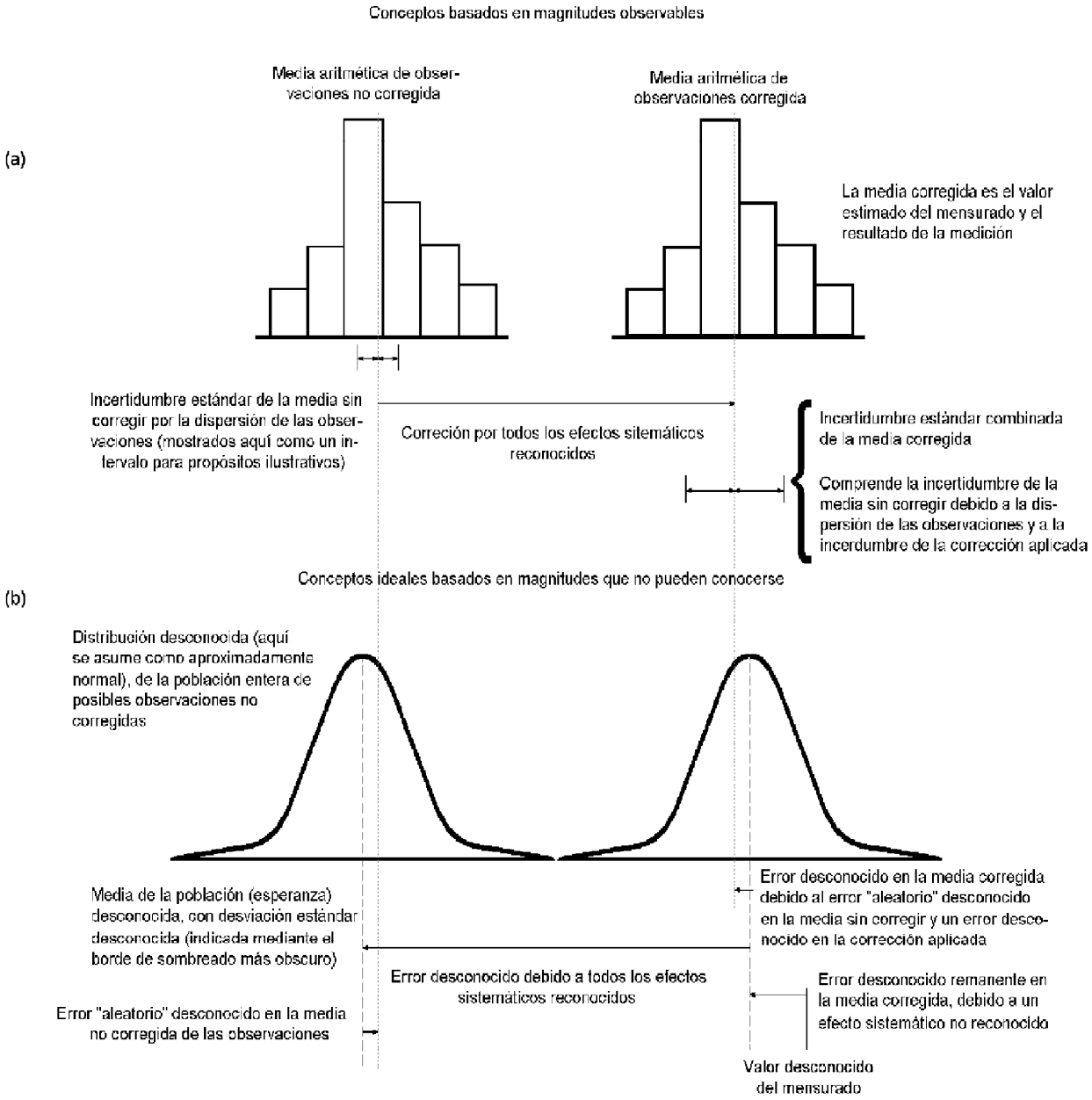


Figura 1.4 Ilustración gráfica de valor, error e incertidumbre

dirección opuesta a la flecha que hubiera ilustrado al error mismo, y viceversa. El texto de la figura aclara si una flecha en particular ilustra una corrección o un error.

Para determinar la incertidumbre de cualquier medición la guía [9] y [29], [30], [31], recomiendan un procedimiento muy general que debe ser adaptado a las condiciones de cada territorio y laboratorio en particular y que será la propuesta de la presente tesis para el caso de

la calibración de recipientes según algoritmo previamente definido y validado, además la guía [9] muestra toda la teoría general sobre la cual está sustentada el cálculo de esta medida de calidad de la medición y sobre la cual está basado todo el cálculo realizado para establecer este parámetro a las calibraciones de los RHCP

1.4.3 Estimación de la incertidumbre combinada [9] y [29], [30], [31], [32]

De acuerdo a lo descrito en el capítulo de Términos y Definiciones , no existe una diferencia fundamental entre las componentes de incertidumbre tipo A y tipo B. Por tanto, la incertidumbre del resultado de la medición debe ser obtenida a partir de las diferentes componentes de incertidumbre evaluadas, mediante algún procedimiento para combinar las mismas y obtener un valor final que represente la incertidumbre estándar del resultado de la medición.

Todo proceso de medición está representado por un modelo matemático dado por la expresión

$Y = F (X_1, X_2, \ldots, X_N)$ **(1.13)**

La incertidumbre estándar combinada del resultado de la medición, designada por $u_c(y)$, se determina mediante la raíz cuadrada positiva de la varianza del valor estimado de *Y* a partir de la ley de suma de varianzas, denominada en este caso ley de propagación de incertidumbre.

Si los argumentos X_i no están correlacionados:

$$u_c^{\,2}(y) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \qquad \textbf{(1.14)}$$

donde cada $u(x_i)$ es una incertidumbre estándar evaluada como componente de tipo A o de tipo B y N representa la cantidad de magnitudes de entrada.

Cuando existe correlación entre las magnitudes de entrada hay que tener en cuenta la covarianza entre las magnitudes correlacionadas y la incertidumbre combinada estaría dada por:

$$u_c^{\,2}(y) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \times u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \times \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \times u(x_i, x_j) \qquad \textbf{(1.15)}$$

donde $u(x_i, x_j)$ es la covarianza estimada asociada con X_i y X_j . En el caso que la correlación entre las variables se pueda asumir como lineal con coeficiente de correlación igual a 1, $u(x_i, x_j) = u(x_i)u(x_j)$ y la incertidumbre combinada es igual a:

$$u_c^2(y) = \left(\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) u(x_i) \right)^2 \Rightarrow u_c(y) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) u(x_i) \qquad \textbf{(1.16)}$$

La covarianza asociada con dos variables aleatorias Xi y Xj puede ser tomada igual a cero o tratada como insignificante si:

a) Sus valores han sido determinados en diferentes experimentos independientes, o porque ellas representan resultados de evaluaciones diferentes que han sido hechas independientemente;

b) Cualquiera de las cantidades Xi y Xj puede ser tratada como constante;

c) La investigación acerca de ellas no arroja información que indique la presencia de correlación entre los valores de entrada de Xi y Xj .

En el caso que la función $Y = f(X_1, X_2, ..., X_N)$ tenga la forma de la siguiente expresión:

$$Y = C X_1^{p_1} X_2^{p_2} \ldots X_N^{p_N} \qquad \textbf{(1.17)}$$

donde los exponentes p_i son números conocidos positivos o negativos que tienen incertidumbre despreciable y las variables X_i son independientes, es práctico trabajar con la incertidumbre estándar combinada relativa $\frac{u_c(y)}{y}$, entonces la expresión (1.17) toma la forma:

$$\left(\frac{u_c(y)}{y} \right)^2 = \sum_{i=1}^{N} \left(p_i \frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2 \qquad \textbf{(1.18)}$$

1.4.4 ONARC. Política de incertidumbre de las mediciones [33], [34]

El ONARC ha establecido una política de incertidumbre con el objetivo de que todos los laboratorios que ejecuten calibraciones y/o ensayos, declaren la incertidumbre de sus mediciones cumpliendo con lo establecido en la NC ISO/IEC 17025:2000 [2]

El conocimiento de la incertidumbre de los resultados de la medición es de fundamental importancia para los laboratorios, sus clientes y todas las instituciones que utilizan dichos resultados con fines comparativos.

La incertidumbre de medición es una medida muy importante de la calidad de un resultado o de un método de medición.

Entre las posibles fuentes que deben ser consideradas como contribuyentes de la incertidumbre total de una medición según ONARC (aunque no todas son relevantes en todos los casos) están:

a) Definición incompleta del mensurando.

b) Preparación, transporte, almacenamiento y manipulación del objeto a medir.

c) Muestreos no representativos (la muestra medida puede no representar el mensurando definido).

d) Conocimiento inadecuado de los efectos de las condiciones ambientales sobre las mediciones, o mediciones imperfectas de dichas condiciones ambientales.

e) Errores de apreciación del operador en la lectura de instrumentos analógicos.

f) Resolución del instrumento o equipo de medición.

g) Incertidumbre de la calibración de los patrones de medición y materiales de referencia.

h) Valores inexactos de constantes y otros parámetros obtenidos de fuentes externas y en los algoritmos y software utilizados.

i) Aproximaciones y suposiciones incorporadas en los métodos y procedimientos de medición.

j) Variaciones en observaciones repetidas del mensurando bajo condiciones aparentemente iguales e incertidumbre que aparece de la corrección de los resultados de la medición por los efectos sistemáticos.

El ONARC tomando en cuenta todo lo descrito anteriormente exige que los laboratorios que realicen calibraciones deben establecer procedimientos para estimar (mediante cálculos) la incertidumbre. Para ello debe realizarse la determinación (o estimación) de todos los componentes de la incertidumbre para cada paso en la cadena de trazabilidad de acuerdo a métodos definidos. Las incertidumbres deben estar avaladas matemáticamente y ser representadas como incertidumbres expandidas usando un nivel de confianza de aproximadamente el 95 % y el factor de cobertura correspondiente. Esta información debe estar disponible y ser lo suficientemente

clara para los usuarios. Los laboratorios de calibración además deben determinar su mejor capacidad de medición [35],[36], [37], estimar y declarar las incertidumbres de las magnitudes de influencia expresadas en sus certificados de calibración y mantener evidencias documentadas de las declaraciones de incertidumbre que incluya: memoria de cálculo, datos de entrada, procedimiento de estimación y demostración de la validez de los resultados de estimación.

1.4.5 Incertidumbre de medición e intervalo de error tolerado

Frecuentemente el resultado de una medición tiene que ser comparado con algunos valores límites definidos en una especificación o documento normativo. Esto es así, por ejemplo, en diferentes mediciones realizadas del proceso de fabricación de un producto, donde es necesario determinar si la variable se encuentra o no en un determinado intervalo (intervalo de error tolerado) que resulta satisfactorio para el desarrollo del proceso dado. También durante la calibración de instrumentos de medición generalmente los errores obtenidos para el instrumento dado se comparan [35]-[38] con el error máximo permisible establecido en normas o especificaciones del fabricante, lo que permite determinar si el instrumento está o no disponible para el uso.

En estos casos, el conocimiento de la incertidumbre de medición ayuda a decidir si el resultado obtenido está bien incluido dentro de los límites aceptables o sólo justamente en los mismos. Si el resultado está próximo a uno de los límites, hay un gran riesgo de que el valor del mensurando no caiga dentro de los márgenes requeridos cuando la banda de sus posibles valores indicada por la incertidumbre de medición es tomada en cuenta en su totalidad. Supongamos por ejemplo, que la medición de una variable de proceso debe tener un valor comprendido en el intervalo (100 $\pm$ 5) si el proceso se está comportando satisfactoriamente. La variable se mide con una incertidumbre de $\pm$ 2,5 que representa la mitad del error tolerado. Si como resultado de la medición de la variable se obtiene el valor 101, esto significa que el resultado de la medición está representado por la banda de valores (y $\pm$ U) = (101 $\pm$ 2,5) = (98,5; 103,5). En este caso, todos los valores de esta banda están comprendidos en el intervalo de aceptación (100 $\pm$ 5), por lo que estamos seguros que la variable cumple con las especificaciones del proceso.

Si la medición de la variable diera el valor 108, haciendo el mismo razonamiento tenemos que la banda de valores obtenida de la variable estaría en el intervalo (108 $\pm$ 2,5) = (105,5 ; 110,5),

que evidentemente está fuera del intervalo de aceptación (100 ± 5), por lo que podemos afirmar que la variable no cumple con las especificaciones del proceso.

Supongamos por ejemplo, que obtenemos al medir el valor 104. La zona de valores que representa el resultado de la medición estaría comprendida en el intervalo (104 ± 2,5) = (101,5; 106,5), donde hay una parte (entre 101,5 y 105) en que la variable cumpliría con las especificaciones del proceso, pero otra parte (de 105 a 106,5) en que estaría fuera de las especificaciones. Puesto que cualquiera de estos valores es igualmente posible como estimación del mensurando, no estaríamos seguros en tal caso si la variable cumple o no las especificaciones.

Luego, la incertidumbre de la medición implica que va a existir un intervalo de posibles resultados de la medición en el cual no podremos afirmar si la variable cumple o no con las especificaciones para ella establecidas. Y como esta duda significa un riesgo de aceptar como bueno un valor que está fuera de especificaciones o rechazar uno que está dentro de especificaciones, es necesario que esta banda de resultados dudosos sea pequeña. Por lo general se recomienda que la **incertidumbre de medición sea entre $1/3$ y $1/10$ del error tolerado,** y de esta manera también se garantiza trazabilidad en las mediciones [39], [40], [41], [42], [29]

Conclusiones Capítulo I

Se establece el marco teórico referencial de la investigación

Se realizó un análisis crítico de los distintos enfoques teóricos sobre la estimación de la incertidumbre, así como de la experiencia práctica nacional, desde el punto de vista metrológico; resultando evidente que la incertidumbre en las calibraciones es un parámetro inherente al desempeño de cada laboratorio en particular , de acuerdo a sus peculiaridades y para cada mesurando de forma individual (entiéndase calibración)

CAPITULO II PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION PARA RECIPIENTES INCLINADOS, Y PARA LA ESTIMACION DE LA INCERTIDUMBRE DE LAS CALIBRACIONES.

2.1 Para la calibración de recipientes inclinados

2.1.1 El Recipiente horizontal de cabezas planas con grado de inclinación y centro de medición desplazado

Para la calibración de RHCP se seguirán los pasos detallados en la figura 2.1, el cual se basa en la norma API correspondiente [4] . En el aforo de recipientes siempre se comprueban antes de la calibración algunas condiciones físicas y de seguridad necesarias, previas a la calibración que pueden invalidar la ejecución del trabajo y que se muestran en el diagrama, a continuación se ejecuta la tarea fundamental de determinación de las capacidades del recipiente. Todas las actividades se registran en el correspondiente documento (Anexo A) para la posterior emisión de los resultados

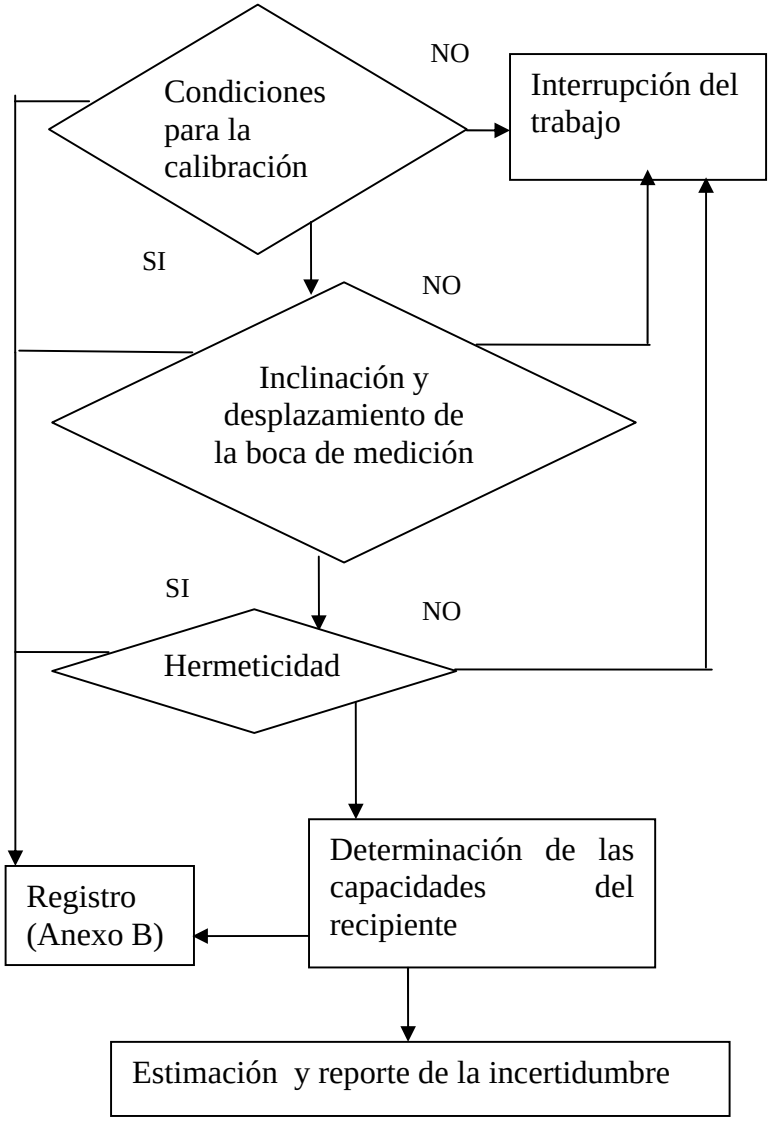


Figura 2.1 Procedimiento general para la calibración de RHCP

2.1.2 Esquema general del RHCP inclinado

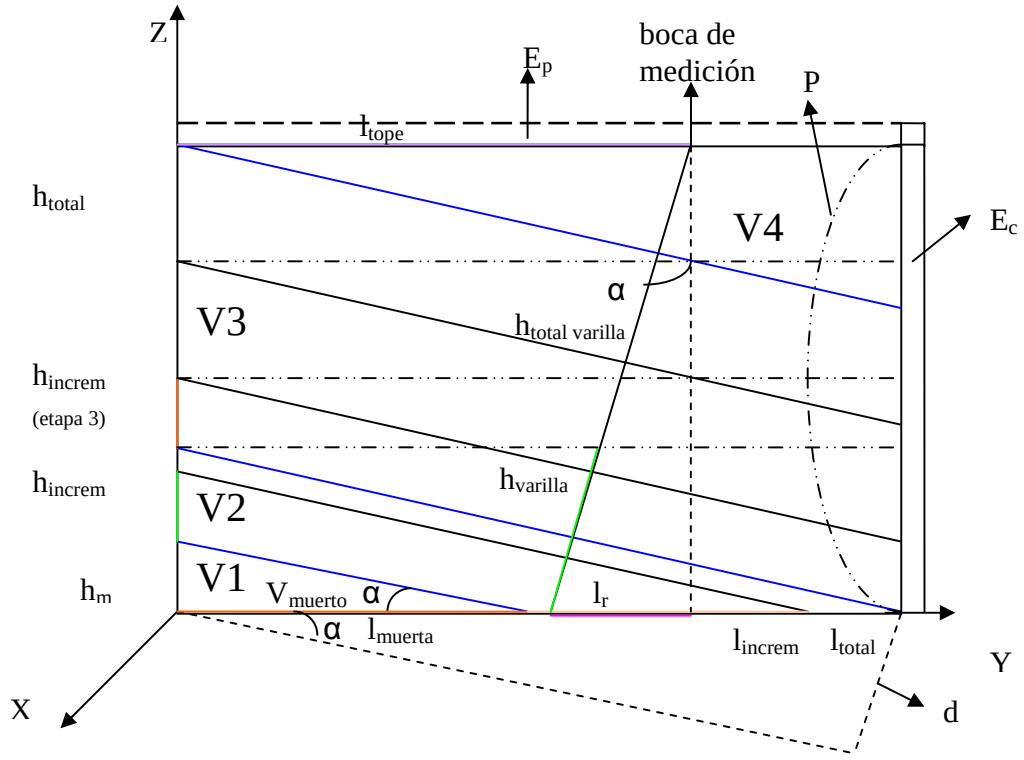


Figura 2.2 Esquema de un RHCP, inclinado, boca de medición desplazada y altura de la varilla hasta el fondo.

LEYENDA

1. l_m (m)- Largo del volumen muerto
2. $l_{total.parcial}$ (w)– Largo a partir del largo del volumen muerto sin llegar al largo total
3. h_m – Altura del volumen muerto
4. V_{muerto} (Vm) – Volumen muerto del tanque
5. $h_{total\ varilla}$ (h) – Altura total de la varilla en el tanque
6. h_{total} – altura total del tanque
7. P - Perímetro del tanque (dato de campo)

$$P = 2\pi(r - 2s) \longrightarrow \quad r = \frac{P - 2\pi s}{2\pi} \qquad (2.1)$$

8. E_c (s) – Espesor de las paredes de las cabezas del tanque (dato de campo)
9. E_p (s)– Espesor de las paredes del cuerpo del tanque (dato de campo)
   Nota: Por simplicidad se asume que los espesores ambos son iguales
10. l_{tope} (t)– Largo desde el borde del tanque a la boca de medición en el sentido de llenado del tanque

11. l_{total} (l)– Longitud total del tanque (dato de campo)
12. l_{increm} (c)– Longitud de llenado del tanque
13. h_{increm} – Altura incrementada en el llenado del tanque, sin llenar a cubrir el largo del mismo(después de cubierto el largo se convierte en la $h_{total\ parcial(etapa2)}$
14. $h_{increm\ (etapa\ 3)}$ – Altura incrementada en el llenado del tanque, después de cubierto el largo del mismo
15. $h_{varilla}$(v)– Altura de la varilla, marcada por el volumen de líquido incorporado al tanque (dato de campo)
16. l_{tope} – Longitud del tanque hasta la boca de medición en el sentido de llenado del tanque (dato de campo)
17. l_r – Diferencia entre l_{tope} y l_m
18. d- Cateto que marca la diferencia de planos horizontales de los bordes extremos del tanque para determinar el ángulo de inclinación (dato de campo)
19. α - Angulo de inclinación del tanque.

$$\alpha = arcsen\frac{d}{l_{total}} \qquad (2.2)$$

Ecuación del tanque: $\left(Z - r\right)^2 + X^2 = r^2$ r -- radio del cilindro (2.3)

Nota: La utilización de símbolos de una letra señalados entre paréntesis, resulta de la necesidad del trabajo con el software DERIVE versión 6.00

2.1.2.1 Posición de la boca de medición

La boca de medición desplazada del centro del tanque puede ocupar diferentes posiciones características, vinculadas con el punto de choque de la varilla con el tanque y la forma de llenado del tanque. La varilla pudiera tocar el fondo del tanque o una cabeza del tanque, y el líquido pudiera llenar primero el largo y después la altura o primero la altura y después el largo. Un estudio realizado (ver 3.2) demuestra que los tanques de medición que se usan en combustibles y que están inclinados con la boca de medición desplazada, la varilla choca el fondo del tanque y el líquido llena primero el largo del recipiente que la altura, por lo que se impone establecer condiciones fronteras a ser evaluadas, antes de proseguir la medición.

Si el tanque se encuentra levantado del lado derecho:

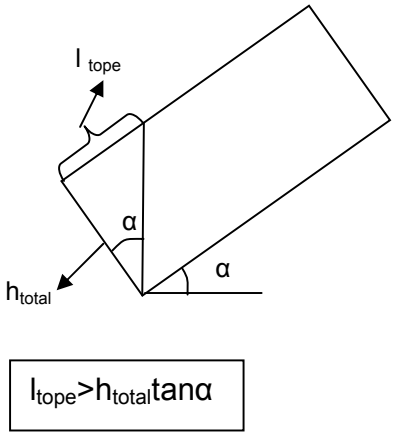


Figura 2.3 Condición de la frontera izquierda

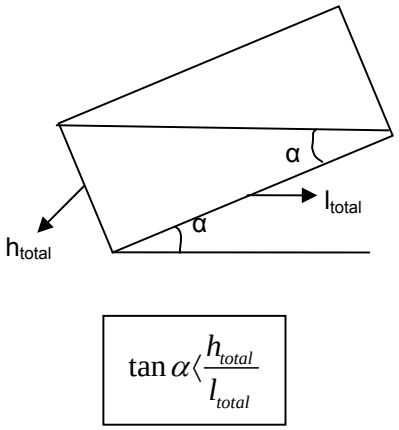


Figura 2.4 Condición de la frontera derecha

2.1.3 Determinación de las capacidades del recipiente:

La determinación de las capacidades del recipiente se realiza en cuatro etapas

- Primera etapa: Determinación del volumen muerto: Consiste en la determinación de aquella cantidad de contenido de líquido que no se registra en la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido
- Segunda etapa: Determinación del volumen del líquido hasta la altura de la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido, que determina el alcance de la longitud total del tanque por el líquido.

- Tercera etapa: Determinación del volumen del líquido hasta la altura de la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido , que determina el alcance de la altura total del tanque por el liquido
- Cuarta etapa: Determinación del volumen del líquido hasta la altura de la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido, que determina el alcance de la longitud del tanque por el líquido por la parte superior del mismo hasta la boca o lugar de medición, final del aforo.

2.1.4 Primera Etapa

El volumen muerto se determina por medio de la integral triple (2.4) y cuyo resultado se puede consultar en el anexo CD.

$$Vm = 2\int_0^m dy \int_0^{a+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx = Vregistro \qquad (2.4)$$

donde:

- $Z = a + by \qquad a, b \in R$ (2.5)

  es la ecuación de la recta que representa la proyección del plano del líquido, donde las constantes a y b se buscan mediante los puntos $P_1(l_m,0)$ y $P_2(0,h_m)$
- $a = h_m$ (2.6)
- $h_m = m\tan\alpha$ (2.7)
- $m = t - l_r$ (2.8)
- $lr = h\ sen\alpha$ (2.9)
- $m = t - h\ sen\alpha$ (2.10)
- $a = \left(t - hsen\alpha\right)\tan\alpha$ (2.11)
- $h = \dfrac{h_{total}}{\cos\alpha} = \dfrac{2r}{\cos\alpha}$ (2.11a)

  de (2.1) , (2.2), (2.10),(2.11), (2.11a)
- $a = \left((t-s) - \dfrac{P - 2\pi s}{\pi \cos arcsen \dfrac{d}{l-2s}} \dfrac{d}{l-2s} \right) \tan arcsen \dfrac{d}{l-2s}$ (2.11b)
- $m = \left((t-s) - \dfrac{P - 2\pi s}{\pi \cos arcsen \dfrac{d}{l-2s}} \dfrac{d}{l-2s} \right)$ (2.11c)

- b = - h_m/m (2.12)
- $\tan\alpha = \frac{h_m}{m}$ (2.13)

de (2.12) y (2.13)

- $b = -\tan\alpha$ (2.14)

de (2.2) y (2.14)

- $b = -\tan arcsen\frac{d}{l-2s}$ (2.14a)

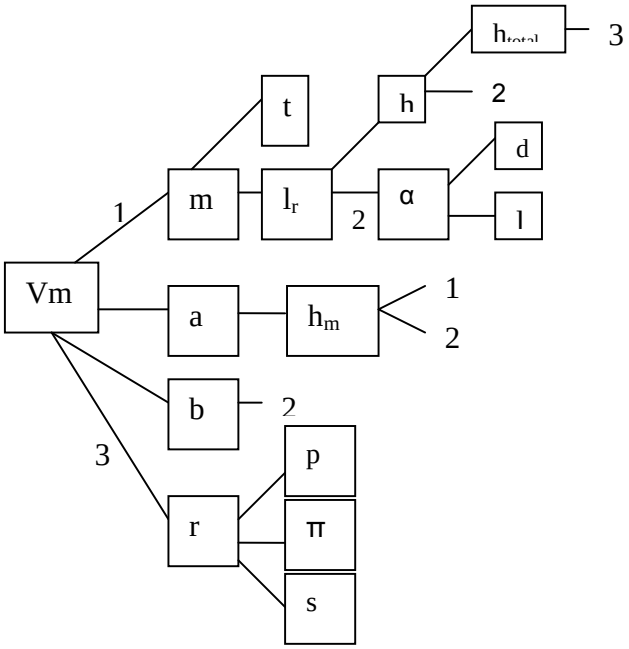


Figura 2. 5 Arbol de dependencia del volumen en la primera etapa

La incertidumbre en la primera etapa depende de:

- l_{tope} (t)
- D $_{iferencia\ de\ planos}$ (d)
- l_{total} (l)
- $P_{erímetro.}$ (p)
- π
- E_{spesor} (s)

2.1.5 Segunda Etapa

El volumen del líquido hasta la altura de la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido, que determina el alcance de la longitud total del tanque por el líquido,

se determina por medio de la integral triple (2.15) y cuyo resultado se puede consultar en el anexo CD.

$$V = 2\int_0^w dy \int_0^{a+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx = Vregistro \qquad (2.15)$$

Nota: El volumen calculado por esta fórmula ya tiene incorporado el volumen muerto de la primera etapa

donde:

- $Z = a + by \qquad a, b \in R$ (2.16)

  es la ecuación de la recta que representa la proyección del plano del líquido, donde las constantes a y b se buscan mediante los puntos $P_1(l_{total.parcial},0)$ y $P_2(0,h_{total.parcial})$
- $l_{total.parcial}(w)=l_{increm}+l_m(m)$ (2.17)
- $l_{increm} = \frac{h_{varilla}(v)}{sen\alpha}$ (2.18)
- $w = \left(\frac{v}{sen\alpha} + m \right)$ (2.19)
- m (ver 2.11c)
- $a = h_{total.parcial}$ (2.20)
- $h_{total.parcial} = w \tan\alpha$ (2.21)

  de (2.17), (2.18) y (2.19)
- $a = \tan\alpha \left(\frac{v}{sen\alpha} + m \right)$ (2.22)
- α (ver 2.2)
- b (ver 2.14)
- r (ver 2.1)

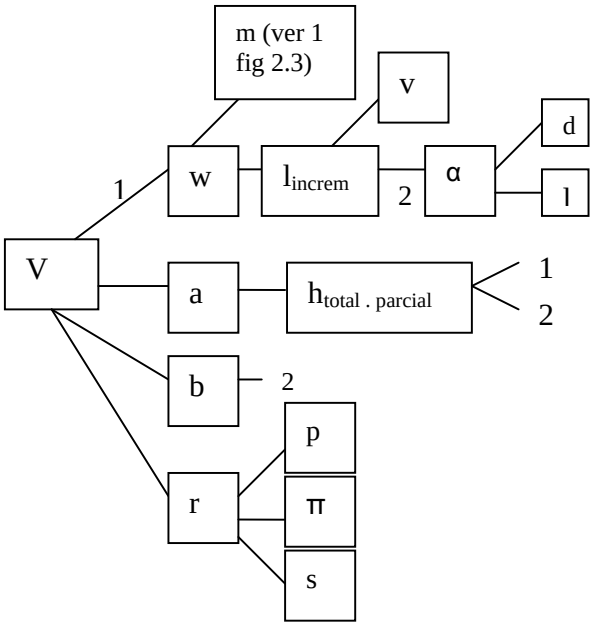


Figura 2.6 Arbol de dependencia del volumen en la segunda etapa

La incertidumbre en la segunda etapa depende de:

- l_{tope} (t)
- D $_{iferencia\ de\ planos}$ (d)
- l_{total} (l)
- $P_{erímetro.}$ (p)
- π
- E_{spesor} (s)
- $h_{varilla}$ (v)

La incertidumbre en la segunda etapa contiene la $h_{varilla}$ como único elemento nuevo de medición. Esta etapa concluye cuando la altura de la varilla $h_{varilla}$ satisfaga la condición:

$$l_{totalparcial} = l_{increm} + l_m \leq l_{total} \tag{2.23}$$

y se puede obtener de:

$$h_{varilla} = \left(l_{total} - l_m\right) sen\alpha \tag{2.24}$$

El incremento parcial del volumen por cm hasta esa $h_{varilla}$ es un problema de programación.

Es importante observar además que como:

$$h_{varilla} = l_{increm} sen\alpha \tag{2.25}$$

Si la altura de la varilla se incrementa 1 cm

$$h_{varilla} + 1 = l_{increm,nueva} sen\alpha \quad (2.26)$$

El incremento de longitud producido por este cambio (l_{cambio})

$$l_{cambio} = l_{increm.nueva} - l_{increm} \quad (2.27)$$

$$l_{cambio} = \frac{h_{varilla} + 1}{sen\alpha} - \frac{h_{varilla}}{sen\alpha} \quad (2.28)$$

$$l_{cambio} = \frac{1}{sen\alpha} \quad (2.29)$$

y podemos llegar a la conclusión de que el cambio depende de la inclinación, o sea, mientras mayor sea el ángulo de inclinación del tanque, menor será la longitud muerta y menor será la longitud de cambio y mas veces será calculado el volumen en la segunda etapa durante su programación.

2.1.6 Tercera Etapa

Cubierta la longitud total, el nivel de líquido aumenta parejo en ambas caras del tanque. El volumen del líquido hasta la altura de la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido, que determina el alcance de la altura total del tanque por el líquido, se determina por medio de la integral triple (2.30) y cuyo resultado se puede consultar en el anexo CD.

$$V = 2\int_0^{l-2s} dy \int_0^{k+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx + 2\int_0^{l-2s} dy \int_{k+by}^{a+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx \quad (2.30)$$

Nota: El volumen calculado por esta fórmula ya tiene incorporado el volumen de las dos etapas anteriores

donde:

- $Z = a + by \qquad a, b \in R$ (2.31)

  es la ecuación de la recta que representa la proyección del plano del líquido, donde las constantes a y b se buscan mediante los puntos $P_1(0;a)$ $P_2(l_{total};h^*_{increm.etapa3})$,

- $a=h^*_{increm.etapa3}+h_{total\ parcial.etapa2}$ (2.32)

  Nota 1:$h^*_{increm(etapa3)}$ –se ha resaltado con el asterisco para simbolizar la altura acumulada en la etapa 3

El valor de ¨a¨ es el elemento que en esta etapa depende de la altura de la varilla ($h_{varilla}$) y cuya representación se puede ver en la figura 2.7

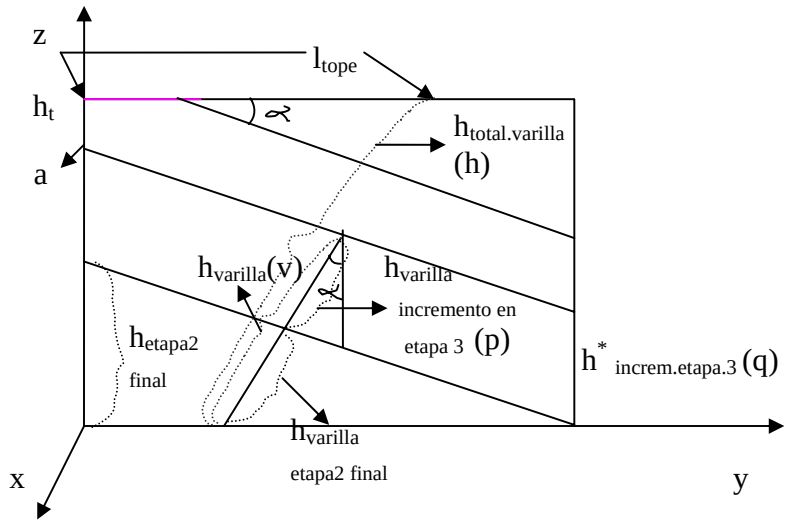


Figura 2.7 Esquema para la cuarta etapa de medición de un RHCP, inclinado, boca de medición desplazada y altura de la varilla hasta el fondo.

- $p = h_{varilla(v)} - h_{varilla.etapa2\ final}$ (2.33)
- $h_{varilla.etapa2\ final} = (l - 2s - l_m)sen\alpha$ (2.34)
- $\cos\alpha = \frac{p}{q}$ (2.35)
- $q = \frac{h_{varilla} - sen\alpha(l - 2s - l_m)}{\cos\alpha}$ (2.36)
- $h_{etapa2\ final} = (l - 2s)\tan\alpha$ (2.37)
- $a = h_{etapa2\ final} + q$ (2.38)

de 2.2, 2.36, 2.37, 2.38

- $a = \frac{h_{varilla} - sen\alpha(l - 2s - l_m)}{\cos\alpha} + (l - 2s)\tan\alpha$ (2.39)
- $a = \frac{h_{varilla(v)} + \left(d/(l - 2s)\right) l_{m(m)}}{\cos\left(arc\sin\left(d/(l - 2s)\right)\right)}$ (2.40)
- α (ver 2.2)
- b (ver 2.14)
- r (ver 2.1)

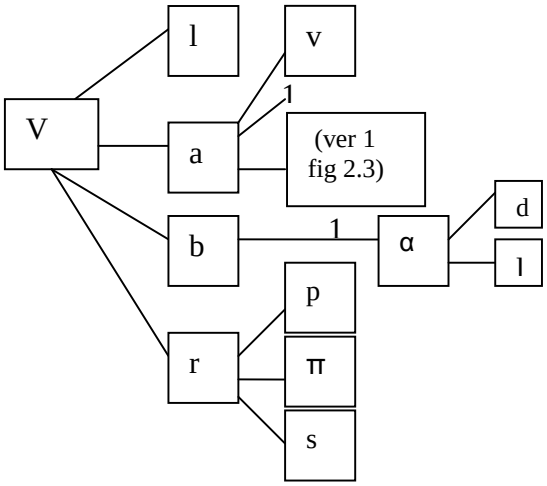


Figura 2.8 Arbol de dependencia del volumen en la tercera etapa

La incertidumbre en la tercera etapa depende de:

- l_{tope} (t)
- D $_{iferencia\ de\ planos}$ (d)
- l_{total} (l)
- $P_{erímetro.}$ (p)
- π
- E_{spesor} (s)
- $h_{varilla}$ (v)

En esta etapa es suficiente conocer la altura de la varilla $h_{varilla}$ que satisfaga la condición:

$$h_{total.parcial.etapa2} + h_{increm.etapa3} \leq h_{total} \qquad (2.41)$$

que es análoga a:

$$a \leq h_{total} \qquad (2.42)$$

El incremento parcial del volumen por cm hasta esa $h_{varilla}$ es un problema de programación.

La $h_{varilla}$ que hace cumplir la condición exactamente se obtiene a partir de la fórmula:

$$h_{varilla}(v) = h_{total.varilla}(h) - l_{tope}(t)sen\alpha \qquad (2.43)$$

En la tercera etapa no tenemos ningún elemento nuevo de influencia en la incertidumbre para el aforo del recipiente

2.1.7 Cuarta Etapa (etapa final del aforo)

Cubierta la altura total, el líquido comienza a cubrir la longitud superior del tanque. El volumen del líquido hasta la altura de la varilla o cinta de medición de la altura del contenido del líquido, que determina el alcance de la longitud del tanque por el liquido, por la parte superior del

mismo hasta la boca o lugar de medición (longitud tope), se determina por medio de la integral triple (2.44) y cuyo resultado se puede consultar en el anexo CD.

$$V = 2\int_{0}^{l_{increm.etapa\,4}} dy \int_{a+by}^{a} dz \int_{0}^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx + 2\int_{l_{increm.etapa\,4}}^{l-2s} dy \int_{a+by}^{q+by} dz \int_{0}^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx \qquad (2.44)$$

Una mejor comprensión de esta última etapa se puede lograr observando la figura 2.9

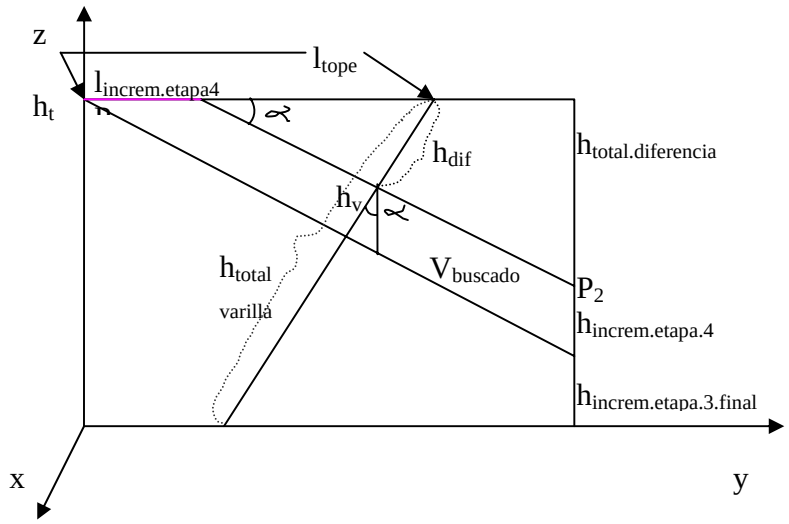


Figura 2.9 Esquema para la cuarta etapa de medición de un RHCP, inclinado, boca de medición desplazada y altura de la varilla hasta el fondo.

- $Z = a + by \qquad a, b \in R$ (2.45)

  es la ecuación de la recta que representa la proyección del plano del líquido cuando este ha concluido la tercera etapa; a representa la altura total del tanque y b la pendiente del nivel del líquido, al igual que en las etapas anteriores

- $Z = q + by \qquad a, b \in R$ (2.46)

  es la ecuación de la recta que representa la proyección del plano del líquido cuando el líquido comienza a llenar el tanque en la cuarta etapa, hasta que el extremo izquierdo del mismo alcance la boca de medición (fig 2.9)

- $a = altura.total = \dfrac{p - 2\pi s}{\pi}$ (2.47)

- $b = -\tan\alpha$ (ver 2.14)

En el caso de q, matemáticamente es un intercepto con el eje ¨z¨ que se va fuera de los límites del tanque, pero que es muy útil en los cálculos y se obtiene mediante la siguiente secuencia

- $q = a + h_{increm.etapa4}$ (2.48)
- $h_{increm.etapa4} = \frac{h_v}{\cos\alpha}$ (2.49)
- $h_v = h_{varilla(v)} - h_{varilla.etapa3}$ (2.50)
- $sen\alpha = \frac{h_{varilla.total(h)} - h_{varilla.etapa3}}{l_{tope(t)}}$ (2.51)
- $h_{varilla.etapa3} = h - (t-s)sen\alpha$
  $h_{varilla.etapa3} = h - (t-s)d/(l-2s)$ (2.52) y (2.53)
- $h_v = v - h + (t-s)d/(l-2s)$ (2.54)
- $h_{increm.etapa4} = \frac{v - h + (t-s)d/(l-2s)}{\cos\alpha}$ (2.55)

de 2.47 y 2.55

- $q = \frac{p - 2\pi s}{\pi} + \frac{v - h + (t-s)d/(l-2s)}{\cos\alpha}$ (2.56)

- α (ver 2.2)
- b (ver 2.14)
- r (ver 2.1)
- $sen\alpha = \frac{h_{varilla.total(h)} - h_{varilla(v)}}{l_{tope(t)} - l_{increm.etapa4}}$ (2.57)

de 2.57

- $l_{increm.etapa4} = t - \frac{l(h-v)}{d}$ (2.58)

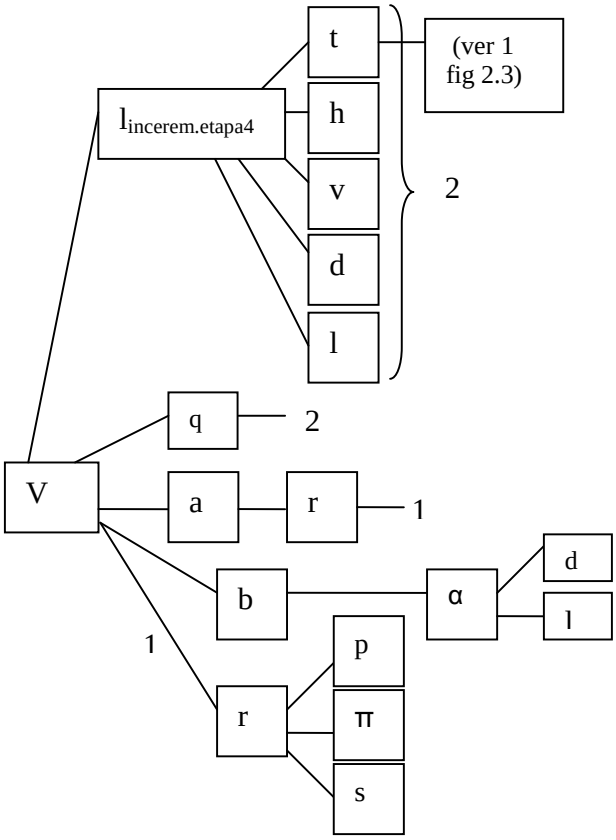


Figura 2.10 Arbol de dependencia del volumen en la cuarta etapa

La incertidumbre en la tercera etapa depende de:

- l_{tope} (t)
- $D_{iferencia\ de\ planos}$ (d)
- l_{total} (l)
- $P_{erímetro.}$ (p)
- π
- E_{spesor} (s)
- $h_{varilla}$ (v)

En esta etapa no aparece ninguna magnitud nueva a medir por tanto no hay elemento nuevo que pueda influir sobra la incertidumbre para el caso del aforo. En el caso de la medición para los volúmenes parciales; la novedad es $h_{varilla}$, como en las últimas etapas, y todo será un problema de programación.

Esta etapa se ejecutará hasta que se cumpla que

$l_{increm.etapa4} \leq l_{tope}$ (esta última es una medición de campo) (2.59)

que se corresponde con la altura total de la varilla $h_{total\ varilla(h)}$, la cual es una medición de campo.

2.1.8 Validación de las fórmulas

La validación de las fórmulas se ejecutó, a través del uso de un tanque hipotético a pequeña escala, al cual se le puede imponer y medir muy fácil un grado de inclinación. La escala utilizada fue en centímetros y llevada a metros para una mejor interpretación de la realidad. El esquema del tanque, sus dimensiones y resultados de la validación (Anexo B) confirman la posibilidad de realización del aforo y programación de un software para la determinación de las capacidades parciales

2.1.9 Determinación de los datos de campo (Grado de Inclinación, Perímetro Exterior, Longitud Exterior, Espesor de la chapa y Altura de la varilla).

- El perímetro exterior se determina con ayuda de al cinta métrica patrón realizando dos mediciones como mínimo distribuidas a 1/4 ó 1/5 de las costuras o solapes verticales y uniformemente en cada rolo.
- La longitud exterior del recipiente se determina con ayuda de la cinta métrica patrón, realizando cuatro mediciones como mínimo distribuidas uniformemente alrededor del perímetro y coincidiendo sus extremos con la parte exterior de las cabezas.
- El espesor de las planchas de los rolos y de las cabezas se determinará con ayuda del medidor ultrasónico de espesor, realizando dos mediciones en cada rolo y en cada cabeza, si el recipiente presenta una capa de pintura gorda y suciedad, se tratará de medir con el pie de rey en los lugares donde sea posible. Cuando esto no ocurra se limpiará la superficie y se medirá o el dato puede ser tomado de los planos, si se encuentran disponibles estos valores.
- El grado de inclinación se determina con un teodolito, el cual registra la diferencia de los planos horizontales en los cuales se encuentran apoyadas ambas caras del tanque respectivamente.
- La altura de la varilla se mide según lo establecido en la norma [3]

2.2 Evaluación y expresión de la incertidumbre del resultado de la medición

La incertidumbre de las mediciones es un parámetro de competencia técnica de un laboratorio y de competencia comercial entre laboratorios, por lo que cada procedimiento que se establezca y la forma de cálculo de los valores, resultan elementos totalmente novedosos

En la figura 2.2 se detallan los pasos generales para la evaluación y expresión de la incertidumbre

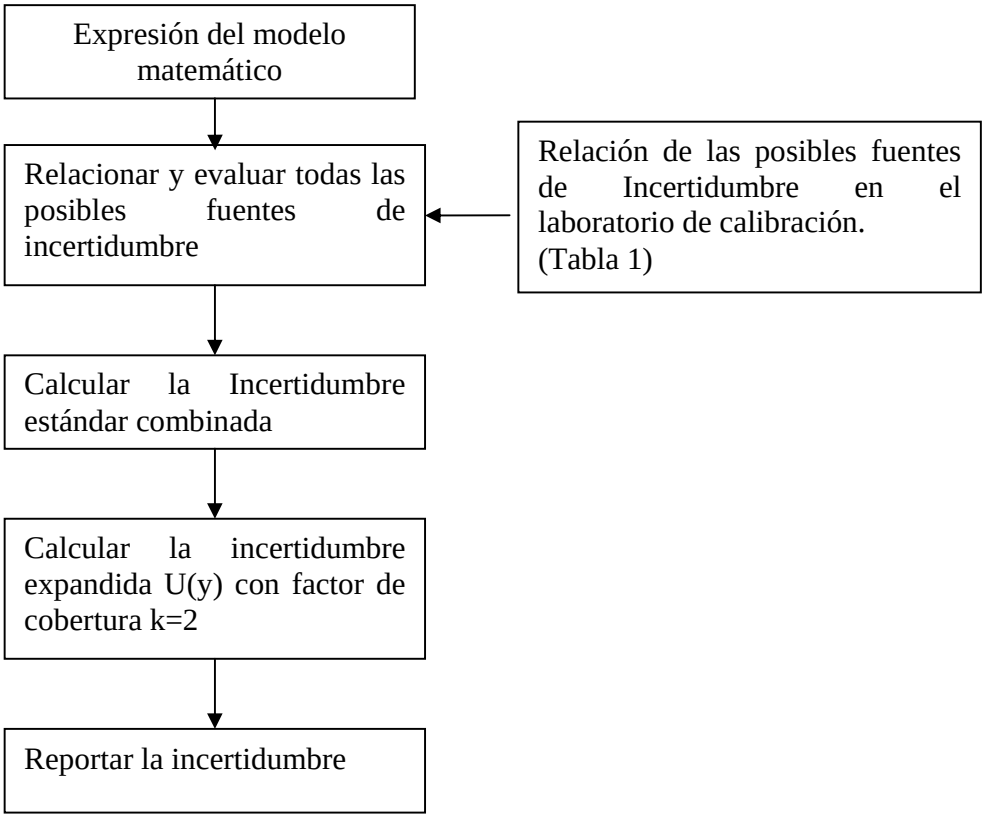


Figura 2.11 Procedimiento general para la evaluación, cálculo y expresión de la incertidumbre en el LPMC

El objetivo de la actividad descrita en el diagrama anterior, es recomendar una guía para la evaluación y expresión de la incertidumbre. El mismo es aplicable a todas las instrucciones de calibración además del aforo de recipiente. Lo planteado en este diagrama no constituye una receta a aplicar de forma obligatoria. Por el amplio espectro de los sistemas de medición que intervienen en cada caso específico, para su aplicación correcta en ocasiones se necesita de un conocimiento más profundo de la Guía BIMP- ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones y del dominio en detalle del procedimiento de medición a considerar. Es útil recordar que la mencionada guía tiene un enfoque orientado a los laboratorios de calibración y constituye la principal razón por la cual la misma fue escogida para el desarrollo del presente trabajo.

En la tabla N.1 se resumen las fórmulas para estimar el valor de la incertidumbre que aportan a la medición del valor final, muchas de las fuentes que están presentes en un proceso de calibración de instrumentos de medición

La utilización o no de los elementos opcionales de la Tabla N.1 , depende de su aplicabilidad o no en el caso del proceso de medición en cuestión. Esto quiere decir que dichos elementos solo pueden ser omitidos cuando definitivamente no procedan para la actividad que se regula.

Tabla N.1: Evaluación de la incertidumbre estándar. Fórmulas.

Posibles fuentes de incertidumbre	**Evaluación de la incertidumbre estándar**	**Observaciones**
Incertidumbre determinada a partir de los resultados establecidos en el certificado de calibración, para los instrumentos patrones y auxiliares. **Nota:** Estos casos se utilizan cuando se emplean los valores verdaderos de los patrones empleados.	$u = \frac{U}{k}$ (T.1)	U: Incertidumbre expandida reportada en el certificado de calibración. k- Factor de cobertura.
	$u = \frac{U}{t_{p(\nu)}}$ (T.2)	Se emplea cuando la incertidumbre ha sido reportada para una probabilidad "p" y "ν" grados de libertad. ***t-*** Coeficiente de Student para probabilidad "p" y "ν" grados de libertad.(Ver tabla G.2 Guía de incertidumbre)
	$u = S(\bar{X})$ (T.3)	Se emplea cuando la incertidumbre que aparece en el certificado de calibración del patrón se establece como un múltiplo de la desviación estándar. En este caso la incertidumbre estándar coincide con la desviación estándar.
	$u = \frac{U}{p}$ (T.4)	Se emplea cuando la incertidumbre que aparece en el certificado de calibración está expresada como un intervalo definido con un nivel de confianza de 90, 95 ó 99% . ***p*=** 1,64 para un nivel de confianza de 90 %

		***p*=** 1,96 para un nivel de confianza de 95 % ***p*=** 2,58 para un nivel de confianza de 99 % (Ver tabla G.1 Guía de incertidumbre)
Por el error máximo permisible (e.m.p) del instrumento patrón empleado	$u = \frac{emp}{\sqrt{P}}$ (T.5)	Se utiliza cuando se emplean los valores nominales de los patrones empleados. ***P*=** 3 si se asume una distribución simétrica y rectangular ***P*=** 6 si se asume una distribución triangular. ***P*=** $(2.58)^2$ si se asume una distribución normal para una "p" del 99%.
Por errores no controlados (efectos aleatorios)	Si n ≥ 10 $u = S(\overline{X}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2}{n(n-1)}}$ (T.6)	$S(\overline{X})$-Desviación estándar experimental de la media $(\overline{X}) = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$ donde n- cantidad de mediciones
	Si n <10 $u = t_k \cdot S(\overline{X})$ (T.7)	Los valores del factor t_k se dan en la tabla 2 para p= 95 %
	Si n ≤3 $u = \frac{X_{max} - X_{min}}{\sqrt{12}}$ (T.8)	Si se asume una distribución uniforme en los límites del recorrido máximo. Esto debe aplicarse en los niveles inferiores de la cadena de calibración donde es común que n ≤ 3.
Resolución del instrumento de medición que se calibra (r).	$u = \frac{r}{\sqrt{12}}$ (T.9)	***r***-Resolución de una indicación digital (menor dígito significativo)
Apreciación en el instrumento de medición que se calibra (a).	$u = \frac{\eta \cdot Vd}{\sqrt{12}}$ (T.10)	***η-*** Fracción apreciable del valor de división (1/1;1/3;1/4;1/10 etc.) del instrumento que se calibra ***Vd***-Valor de división del instrumento que se calibra

Magnitudes influyentes y otros efectos que pueden ser causa de incertidumbre .	$u = \frac{H}{\sqrt{P}}$ (T.11) ó $u = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{12}}$ (A.12)	H-magnitud influyente Se utiliza cuando se emplean los valores nominales de los patrones empleados. ***P*=** 3 si se asume una distribución simétrica y rectangular ***P*=** 6 si se asume una distribución triangular. ***P*=** $(2.58)^2$ si se asume una distribución normal para una "p" del 99%. Magnitudes influyentes: • Temperatura. • Presión atmosférica • Aceleración de la gravedad, etc. Otros efectos: • Histéresis, linealidad, derivas. • Correcciones, redondeos, valores de constantes físicas y matemáticas.

En la mayoría de los casos la magnitud a medir y no se mide directamente, sino que se determina a partir de otras magnitudes $x_1, x_2, \ldots, x_n$ a través de la relación funcional (1.13).

Ejemplo: Para la determinación del valor de las pesas en un manómetro de pistón y pesas se utiliza la siguiente expresión:

$$m_i = \frac{g_n \cdot A_e \cdot P \cdot \left(1 + \rho_a / \rho_m\right)}{g_l} \qquad \textbf{(2.1)}$$

m_i --- Masa de la i-ésima pesa.

g_n –– Aceleración normal de la gravedad.

A_e –– Arrea efectiva del pistón del manómetro de pistón y pesas patrón.

P --- Presión creada por la i-ésima pesa

ρ_a – Densidad del aire.

ρ_m – Densidad del material de la pesa.

g_l – Aceleración local de la gravedad.

Las magnitudes de entrada x_j pueden ser correcciones o factores de corrección de un instrumento de medición, pueden ser correcciones por el efecto de algunas magnitudes influyentes o magnitudes que toman en cuenta otras fuentes de variabilidad tales como diferentes observadores, instrumentos, laboratorios y el tiempo en que las observaciones son hechas.

La función f no debe expresar sólo una ley física sino el proceso de medición, y en particular, estas deben contener todas las magnitudes que pueden contribuir con una incertidumbre significativa al resultado de la medición.

Conclusiones Capítulo II

Se elabora sobre la base de los documentos internacionales y nacionales vigentes:

- El procedimiento de calibración de RHCP inclinados (Anexo A)
- El procedimiento general para la estimación de la incertidumbre de las calibraciones (Anexo C)

CAPITULO III ESTIMACION DEL VALOR DE LA INCERTIDUMBRE EN LA CALIBRACION DE RECIPIENTES

A partir de los procedimientos de calibración y estimación de la incertidumbre descritos en el capítulo anterior, en el presente se describe la forma de obtención del valor de incertidumbre de la calibración del RHCP inclinado y con boca de medición desplazada.

3.1 Estimación de la Incertidumbre en la calibración de Recipiente inclinado con boca de medición desplazada del centro

Para el cálculo se estableció el modelo matemático:

primera etapa

$$Vm = 2\int_0^m dy \int_0^{a+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx = Vregistro \qquad (2.4)$$

segunda etapa

$$V = 2\int_0^w dy \int_0^{a+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx = Vregistro \qquad (2.15)$$

tercera etapa

$$V = 2\int_0^{l-2s} dy \int_0^{k+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx + 2\int_0^{l-2s} dy \int_{k+by}^{a+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx = Vregistro$$

cuarta etapa

$$V = 2\int_0^{l_{increm.etapa4}} dy \int_{a+by}^{a} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx + 2\int_{l_{increm.etapa4}}^{l-2s} dy \int_{a+by}^{q+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx = Vregistro$$

(2.44)

donde los parámetros de estas integrales dependen de:

- l_{tope} (t)
- $D_{\text{iferencia de planos}}$ (d)
- l_{total} (l)
- $P_{\text{erímetro}}$. (p)
- π
- E_{spesor} (s)
- $h_{varilla}$ (v)

y los resultados de las mismas se pueden ver en (Anexo CD)

Fuentes de incertidumbre:

- l_{tope} (t) Por la utilización de la cinta
- $D_{iferencia\ de\ planos}$ (d) Por la utilización del teodolito
- l_{total} (l) Por la utilización de la cinta
- $P_{erímetro.}$ (p) Por la utilización de la cinta
- π Por su aproximación
- E_{spesor} (s) Por la utilización del medidor de espesor
- $h_{varilla}$ (v) Por la utilización de la cinta

Incertidumbre en la determinación del perímetro.

Componentes de incertidumbre:

- Incertidumbre Tipo B debido a la utilización de la cinta. Aquí están presentes las componentes:

a- Error máximo permisible de la cinta.

$$E_M = \pm(10 + 10L)\mu m \;\; Lenm$$

Para 50 m E= ± 510 μm

E≈ ± 0.5 mm

por (T.5)

$$u_1 = \frac{0.5mm}{\sqrt{3}} = 0.3mm$$

b- Variación de la longitud de la cinta producto de la temperatura.

Considerando el coeficiente de dilatación lineal del acero (11,0±1) · 10^{-6} ºC^{-1} , que no se hacen correcciones y que además la temperatura puede tomar valores hasta 40 ºC, para la longitud máxima de 50 m:

$$\Delta l_{max} = l_{max} \cdot 11{,}5 \cdot 10^{-6}(t - 20)$$
$$= 50m \cdot 11{,}5 \cdot 10^{-6}\,{}^{o}C^{-1}(40 - 20)^{o}C$$
$$= 1.15\,mm$$

por (T.5)

$$u_2 = \frac{\Delta l_{max}}{\sqrt{3}} = \frac{1.15\,mm}{\sqrt{3}} = 0.66\,mm$$

La incertidumbre debido a la utilización de la cinta será la raíz de la suma cuadrática de sus componentes

$$u_3 = \sqrt{(0.3)^2 + +(0.66)^2} = 0.72 \cdot 10^{-3}\,m$$

Incertidumbre en la determinación del espesor

La incertidumbre expandida del medidor de espesor es U=0.4 μm ,
por (T.1)

$$u_4 = 0.2 \cdot 10^{-6}\,m$$

Incertidumbre en la determinación del largo.

Al igual que en la determinación del perímetro es de:

$$u_5 = 0.72 \cdot 10^{-3}\,m$$

Incertidumbre en la determinación de π.

π=3,141592 con incertidumbre estándar relativa:
por (T.5)

$$u_6 = \frac{0{,}0000005}{\sqrt{3}} = 3 \cdot 10^{-7}$$

Incertidumbre en la determinación de la longitud tope

Al igual que en la determinación del perímetro es de:

$$u_7 = 0.72 \cdot 10^{-3}\,m$$

Incertidumbre en la determinación de la diferencia de planos

Incertidumbre Tipo B debido a la utilización del teodolito
Error máximo permisible del teodolito.

$E_M = 0.001m$

por (T.5)

$u_8 = \frac{1\ mm}{\sqrt{3}} = 0.578\ mm$

3.2 Determinación de la incertidumbre combinada y expandida

La incertidumbre combinada se determina para cada una de las etapas, usándose la mayor de ellas, y para el caso del recipiente mas crítico para obtener la incertidumbre expandida. Para obtener esos valores es necesario calcular los coeficientes de sensibilidad de cada fuente de incertidumbre (derivadas parciales) (Anexo CD)

A partir de esos resultados y por medio de la ley de propagación de la incertidumbre (1.14) y que para nuestro caso es

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial V_c}{\partial \pi}\right)^2 \cdot u_\pi^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial p}\right)^2 \cdot u_p^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial s}\right)^2 \cdot u_s^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial l}\right)^2 \cdot u_l^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial t}\right)^2 \cdot u_t^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial d}\right)^2 \cdot u_d^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial v}\right)^2 \cdot u_v^2} \quad (3.1)$$

se obtiene el valor de la incertidumbre combinada y después se obtiene la incertidumbre expandida para un valor de k (factor de cobertura k=2) (Anexo CD)

$$U_{\exp} = ku_c \quad (3.2)$$

3.3 Análisis y descripción de los resultados

Entre los años 2003-2006 fueron aforados 676 tanques horizontales. De ellos el perímetro 7 m fue rebasado solo por 6 tanques, que fueron de Gas licuado y los cuales se colocan con inclinación 0°. Se tomó una muestra amplia de 120 tanques, 30 por año, donde 52 de ellos se consideran inclinados por tener la relación diferencia de planos/diámetro del tanque superior a 0.012. Solo 12 de ellos poseen la boca de medición desplazada (Anexo D) y los doce cumplen las condiciones de frontera, lo que demuestra que cualquier tanque que se use en almacenamiento de combustible y este se controle, va a cumplir con las condiciones de fronteras establecidas.

Para la estimación de la incertidumbre se utilizaron los datos provenientes de los instrumentos con que cuenta el laboratorio provincial de metrología de Cienfuegos.

Las fórmulas obtenidas para el cálculo del volumen en las diferentes etapas y sus derivadas (coeficientes de sensibilidad) (Anexo CD), después de validadas (Anexo B), permitieron el cálculo de la incertidumbre para cada etapa Tabla 2

Tabla N.2 Incertidumbre expandida en la calibración de RHCP inclinado y centro de medición desplazado

ETAPA	INCERTIDUMBRE EXPANDIDA %
1	0.004
2	0.330
3	0.520
4	0.200

El valor de la incertidumbre rebasa el valor de 0.33 % solo en la tercera etapa

3.3.1 Descripción del anexo CD . Resultados prácticos

El anexo especial CD está formado por dos carpetas:

1. INSTALACIÓN DE DERIVE VER6.00
2. VOLUMEN VERSION 3

La carpeta VOLUMEN VERSION 3 está formada por 5 carpetas:

1. 0 VOLUMEN GENERAL: Esta carpeta consta de 13 ficheros.
    - volumen 1 ETAPA VER 3 ... muestra la fórmula para el cálculo del volumen en esa etapa.
    - volumen 2 ETAPA VER 3 ... muestra la fórmula para el cálculo del volumen en esa etapa hasta la altura de la varilla correspondiente.
    - volumen 3 ETAPA VER 3 ... muestra la fórmula para el cálculo del volumen en esa etapa hasta la altura de la varilla correspondiente.
    - volumen 4 ETAPA VER 3 ... muestra la fórmula para el cálculo del volumen en esa etapa hasta la altura total de la varilla
    - volumen GENERAL VER 3 ... muestra los volúmenes de las cuatro etapas, agrupados en una sola fórmula
    - VALIDACION VERSION 1 ... muestra la validación de la fórmula a través de los cálculos de volumen por etapas de un tanque de capacidad conocida
    - modelos integrales ver 3 ... muestra las fórmulas usadas para calcular los volúmenes totales de cada etapa
    - fórmulas de sustitución ... muestra muchas de las fórmulas escritas en DERIVE, que fueron utilizadas en la elaboración de las integrales y su posterior sustitución y que están todas recogidas en el cuerpo de la tesis

- DERIVADA DIFERE DE PLANOS VER 3 ... muestra la derivada parcial del volumen general con respecto a la diferencia de planos (d)
- DERIVADA DIFERE DE PLANOS VER 3 ... muestra la derivada parcial del volumen general con respecto al espesor (s)
- DERIVADA DIFERE DE PLANOS VER 3 ... muestra la derivada parcial del volumen general con respecto a la longitud tope (t)
- DERIVADA DIFERE DE PLANOS VER 3 ... muestra la derivada parcial del volumen general con respecto a la longitud total (l)
- DERIVADA DIFERE DE PLANOS VER 3 ... muestra la derivada parcial del volumen general con respecto a la constante PI (π)
- DERIVADA DIFERE DE PLANOS VER 3 ... muestra la derivada parcial del volumen general con respecto al perímetro (p)

2. etapa 1 individual: Esta carpeta consta de 8 ficheros.
   - derivada respecto a difer plano 1 tanque e ... muestra la derivada parcial respecto a la diferencia de planos en la primera etapa
   - derivada respecto a espesor 1 tanque c ... muestra la derivada parcial respecto al espesor en la primera etapa
   - derivada respecto a longitud tope 1 tanque f ... muestra la derivada parcial respecto a la longitud tope en la primera etapa
   - derivada respecto a longitud total 1 tanque d ... muestra la derivada parcial respecto a la longitud total en la primera etapa
   - derivada respecto a perímetro 1 tanque b ... muestra la derivada parcial respecto al perímetro en la primera etapa
   - derivada respecto a PI 1 tanque a ... muestra la derivada parcial respecto a la constante PI en la primera etapa

     Nota: las letras minúsculas al final del nombre del fichero simbolizan la representación de la mencionada derivada dentro de la fórmula de incertidumbre combinada
   - derivadas al cuadrado e incertidumbre expandida ... muestra el cálculo de la incertidumbre combinada y expandida hasta esta etapa
   - volumen 1 ETAPA individual ... fórmula del volumen de la primera etapa

3. etapa 2 individual: Esta carpeta consta de 9 ficheros.
   - derivada respecto a difer plano 2 tanque e ... muestra la derivada parcial respecto a la diferencia de planos en la segunda etapa

- derivada respecto a espesor 2 tanque c ... muestra la derivada parcial respecto al espesor en la segunda etapa
- derivada respecto a longitud tope 2 tanque f ... muestra la derivada parcial respecto a la longitud tope en la segunda etapa
- derivada respecto a longitud total 2 tanque d ... muestra la derivada parcial respecto a la longitud total en la segunda etapa
- derivada respecto a perímetro 2 tanque b ... muestra la derivada parcial respecto al perímetro en la segunda etapa
- derivada respecto a PI 2 tanque a ... muestra la derivada parcial respecto a la constante PI en la segunda etapa
- derivada respecto a altura de varilla 2 tanque g ... muestra la derivada parcial respecto a la altura de la varilla en la segunda etapa

  Nota: las letras minúsculas al final del nombre del fichero simbolizan la representación de la mencionada derivada dentro de la fórmula de incertidumbre combinada
- derivadas al cuadrado 2 etapa e incertidumbre expandida ... muestra el cálculo de la incertidumbre combinada y expandida hasta esta etapa
- volumen 2 ETAPA individual ... fórmula del volumen acumulado hasta una determinada altura de la varilla en esta etapa

4. etapa 3 individual: Esta carpeta consta de 9 ficheros.
   - derivada respecto a difer plano 3 tanque e ... muestra la derivada parcial respecto a la diferencia de planos en la tercera etapa
   - derivada respecto a espesor 3 tanque c ... muestra la derivada parcial respecto al espesor en la tercera etapa
   - derivada respecto a longitud tope 3 tanque f ... muestra la derivada parcial respecto a la longitud tope en la tercera etapa
   - derivada respecto a longitud total 3 tanque d ... muestra la derivada parcial respecto a la longitud total en la tercera etapa
   - derivada respecto a perímetro 3 tanque b ... muestra la derivada parcial respecto al perímetro en la tercera etapa
   - derivada respecto a PI 3 tanque a ... muestra la derivada parcial respecto a la constante PI en la tercera etapa
   - derivada respecto a altura de varilla 3 tanque g ... muestra la derivada parcial respecto a la altura de la varilla en la tercera etapa

Nota: las letras minúsculas al final del nombre del fichero simbolizan la representación de la mencionada derivada dentro de la fórmula de incertidumbre combinada

- derivadas al cuadrado 3 etapa e incertidumbre expandida ... muestra el cálculo de la incertidumbre combinada y expandida hasta esta etapa
- volumen 3 ETAPA individual ... fórmula del volumen acumulado hasta una determinada altura de la varilla en esta etapa

5. etapa 4 individual: Esta carpeta consta de 9 ficheros.
   - derivada respecto a difer plano 4 tanque e ... muestra la derivada parcial respecto a la diferencia de planos en la cuarta etapa
   - derivada respecto a espesor 4 tanque c ... muestra la derivada parcial respecto al espesor en la cuarta etapa
   - derivada respecto a longitud tope 4 tanque f ... muestra la derivada parcial respecto a la longitud tope en la cuarta etapa
   - derivada respecto a longitud total 4 tanque d ... muestra la derivada parcial respecto a la longitud total en la cuarta etapa
   - derivada respecto a perímetro 4 tanque b ... muestra la derivada parcial respecto al perímetro en la cuarta etapa
   - derivada respecto a PI 4 tanque a ... muestra la derivada parcial respecto a la constante PI en la cuarta etapa
   - derivada respecto a altura de varilla 4 tanque g ... muestra la derivada parcial respecto a la altura de la varilla en la cuarta etapa

     Nota: las letras minúsculas al final del nombre del fichero simbolizan la representación de la mencionada derivada dentro de la fórmula de incertidumbre combinada
   - derivadas al cuadrado 4 etapa e incertidumbre expandida ... muestra el cálculo de la incertidumbre combinada y expandida hasta esta etapa
   - volumen 4 ETAPA individual ... fórmula del volumen acumulado hasta una determinada altura de la varilla en esta etapa

Conclusiones Capítulo III

- Se determinaron las fuentes de incertidumbre en la calibración de los recipientes, para las diferentes etapas y se estimaron sus valores
- Se determinó la incertidumbre combinada para cada etapa
- Se determinó la incertidumbre expandida para cada etapa

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El reconocimiento tácito de que :

1. En Cuba los tanques horizontales se montan con un grado de inclinación determinado
2. El control de combustibles y líquidos preciados es de vital importancia para el país
3. Los medios técnicos para el aforo volumétrico de los recipientes son costosos de adquirir y mantener

ha permitido el desarrollo del presente trabajo. Para esto se han tenido en cuenta todos los requisitos establecidos en la NC-ISO/IEC 17025:2000, los establecidos por la ONARC y otras normas y documentos tanto nacionales como internacionales

Como parte de este trabajo se realizó un profundo estudio de la guía de incertidumbre ISO y se ha elaborado un procedimiento general para la estimación de la incertidumbre de las calibraciones.

Como resultado final se cuenta con un procedimiento para realizar el aforo de recipientes horizontales inclinados con boca de medición desplazada y además la estimación de la incertidumbre del mismo permite insertar el resultado de la calibración laboratorio en la cadena de trazabilidad correspondiente cumpliendo con las recomendaciones:

1. Utilizar en la estimación de la incertidumbre del volumen, el valor de la incertidumbre del certificado de calibración de la cinta métrica, especialmente en la tercera etapa
2. Utilizar cinta métrica con error máximo permisible de $\pm$ 0.25 mm en 50 m

El valor fundamental económico y social de este trabajo ha sido escribir un procedimiento que de ser aplicado legalmente permitiría:

- Evitar que los clientes realicen múltiples reclamaciones
- Controlar con exactitud las existencia reales en los recipientes y así permitir el ahorro de recursos, al evitar su desvío
- Inspirar la confianza del gobierno y autoridades públicas como: las autoridades supervisoras, compradoras y receptoras de líquidos en almacenamiento
- Ahorros de costo en tangibles e intangibles, debido al uso de una instrumentación mas barata y de fácil movilidad, lo que garantiza que el servicio sea prestado en ínfimo tiempo y con escasos recursos.

BIBLIOGRAFIA

[1] Gaceta Oficial de la República de Cuba Decreto-Ley No.182 de Normalización y Calidad. Vig. Febrero 1998

[2] NC-ISO/IEC 17025:2000 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración. Organización Internacional de Normalización. Vig. 2000

[3] NC 90-04-13:81 Recipientes Horizontales de Cabezas Planas. Métodos y medios de verificación. Vig. 1981

[4] API Standard 2551 Standard method for measurement and calibration of horizontal tanks. Vig. 1987

[6] Conts, W.L.; (1948): Calibration of cylindrical tanks with axis inclined. Journal of Institute of Petroleum, Vol 34 N 297

[7] Vocabulario internacional de términos básicos y generales en metrología, segunda edición 1993 (VIM-2) . Organización Internacional de Normalización. Vig. Noviembre 1996

[8] ISO 3534-1: 1993, Estadísticas. Vocabulario y símbolos - Parte I Probabilidad y términos estadísticos generales. Organización Internacional de Normalización . Vig. 1999

[9] Guía BIPM/ISO (GUM) Para la expresión de la incertidumbre en las mediciones, publicada por BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC IUPAP y OIML. Vig 1993

[10] ISO 5725-1:1999, Exactitud (veracidad y precisión) de los resultados y métodos de medición — Parte 1: Principios generales y definiciones Vig Septiembre 1998

[11] ISO 5725-2:1999, Exactitud (veracidad y precisión) de los resultados y métodos de medición — Parte 2: Método básico para la determinación de la repetibilidad y de la reproducibilidad de un método de medición normalizado. Vig. Junio 1999

[12] ISO 5725-3:1999, Exactitud (veracidad y precisión) de los resultados y métodos de medición — Parte 3: Mediciones intermedias de la precisión de un método de medición normalizado. Vig. Junio 1999

[13] ISO 5725-4:1999, Exactitud (veracidad y precisión) de los resultados y métodos de medición — Parte 4: Métodos básicos para la determinación de la justeza de un método de medición normalizado. Vig. Junio 1999

[14] ISO 5725-6:1999, Exactitud (veracidad y precisión) de los resultados y métodos de medición — Parte 6: Utilización en la práctica de valores de exactitud. Vig. Junio 1999

[15] ONARC. Organo Nacional de Acreditación de la República de Cuba. Política de Trazabilidad de las mediciones. Vig. Julio 2004

[16] Colectivo de autores (2004). La trazabilidad metrológica en Cuba. La Habana Publicación de la Oficina Nacional de Normalización. pag. 22

[17] ILAC-P10:2002 ILAC Policy on Traceability of Measurement Results. Vig. 2000

[18] A2LA Asociación Americana para la Acreditación de Laboratorios. Política de A2LA de Trazabilidad de las Mediciones. Vig. 2000.

[19] Martínez, R.L.; *Aseguramiento de la Calidad, Trazabilidad y Niveles de Incertidumbre .Usos de certificados de calibración.* (en línea) Consultada: 2002

Disponible en:

http://www.cenam.mx/calibracion/OtraInformacion.asp

[20] Abernethy, R.B.; (1987): ASME Measurement Uncertainty in Fluid Measurements. NY. ASME Fed. Vol. 58. p 22-25

[21] Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurment Result. NIST Technical Note 1297. Gaithersburg, MD. Vig Septiembre 1994.

[22] Machado, C.A.; (2004): Algoritmos de control estadístico y regulación de los procesos con aplicaciones basadas en la incertidumbre de las mediciones. Villa Clara 109 h. Tesis para la opción del grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas (revisión predefensa). Universidad Central de Las Villas.

[23] Colectivo de autores. (1996): Evaluation of Correlate Bias Approximations in Experimental Uncertainty Analysis. USA. AIAA Journal E-book publication. Vol. 54, N.5 p 65-69

[24] Coleman, H.W. ; Steele, W.G. (1999): Experimentation of Uncertainty Analysis for Engineers. JohnWiley and Sons, Inc.

[25] Coleman, H.W. ; Steele, W.G. ; (1995): Engineering Application of Uncertainty Analysis. AIAA Journal E-book publication. Vol. 33, N.10.

[26] Kline, S.J. ; McClintock, F.A. (1953): Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. Mechanical Engineering Vol. 75

[27] BIPM/ISO Bureau International des Poids et Mesures (1995): Combined Result and Associated Uncertainty from Interlaboratory Evaluations based on the ISO Guide. Rev.

[28] Recomendación INC-1 (1980). Published by CIPM (1981), BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures 49,8-9, 26 (en francés)

[29] EAL-R2, European Cooperation for Acreditation (of Laboratories) : Expression of the Uncertainty in Calibration, Requirement Document . Vig. 1998

[30] EAL-R2-S1 European Cooperation for Acreditation (of Laboratories): Supplement 1 to EAL-R2 Expression of the Uncertainty in Calibration, Requirement Document . Vig. 1998

[31] NIST National Institute of Standards and technology USA. (1994): Guías para la Evaluación y Expresión de la Incertidumbre de los Resultados de las Mediciones de NIST. Vig. Septiembre 1994

[32] Colectivo de autores 2002. *Estrategia para el cálculo de incertidumbre* (en línea)
Consultada: Noviembre 2005

Disponible en:

http://www.quimica.urv.es/quimio/general/estinc.pdf

[33] ONARC. Organo Nacional de Acreditación de la República de Cuba. Política de Incertidumbre de las mediciones. Vig. 2004

[34] A2LA Asociación Americana para la Acreditación de Laboratorios. Interim Policy on Measurement Uncertainty for Testing Laboratories. Vig 2000

[35] Oficina Nacional de Normalización. *Servicio Nacional de metrología* (en línea) Consultada: Noviembre 2005

Disponible en:

http://www.nc.cubaindustria.cu/metrologia/servicio_nac.htm

[36] Instituto mexicano del petróleo. Area presión. *Acreditación P-38 NMX-EC-17025-IMNC-2000* (en línea) Consultada: Diciembre 2006

Disponible en:

http://www.economia.gob.mx/work/normas/Aprobacion/Laboratorios_de_calibracion/Presion.pdf

[37] Instituto nacional de técnica aeroespacial Madrid. *Area masa. Acreditación 16/LC 143 2003* (en línea) Consultada: Diciembre 2006

Disponible en:

http://www.enac.es/html/anx/lc/INTA_LC143_REV4.pdf

[38] Tom Kegel, 2004, Conferencia sobre Flujo del Sudeste Asiático. *Análisis de Incertidumbres de Mediciones Volumétricas de Medidores de Turbina y Ultrasónico - Parte 2, Temas Avanzados* (en línea) Consultada: Noviembre 2005

Disponible en:

http://espanol.ceesi.com/pubs_ultrasonic.aspx

[39] L&C Consultores C.A. Nota técnica NT OO2/03 *Trazabilidad de las mediciones*. (en línea) Consultada: Noviembre 2006

Disponible en:
http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Gestion%20de%20la%20calidad/Trazabilidad%20en%20las%20mediciones.pdf

[40] Colectivo de autores. *Trazabilidad e incertidumbre de los resultados experimentales*. (en línea) Consultada: Noviembre 2006

Disponible en:

http://www.ciao.es/Trazabilidad_e_incertidumbre_de_los_resultados_experimentales_54296

[41] Organismo Argentino de Acreditación 2003. *Trazabilidad de las mediciones en los laboratorios de calibración y ensayo.* (en línea) Consultada: Noviembre 2005

Disponible en:

http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Gestion%20de%20la%20calidad/Trazabilidad%20de%20las%20mediciones.pdf

[42] Organismo de Acreditación Ecuatoriano. *Política sobre la trazabilidad de las mediciones* (en línea) Consultada: Octubre 2006

Disponible en:

http://www.calidadecuador.gov.ec/dmdocuments/Politica-Trazabilidad-OAE-Rev0.doc

[43] Roig , M.T.;(2004) Procedimiento para la evaluación y expresión de la incertidumbre en las mediciones de calibración. Villa Clara 80 h. Tesis para la opción del grado científico de Máster en Ciencias. Universidad Central de Las Villas.

[44] Franco J.; Maury A.; Espinosa G.; Alonso N.; Többen H.; Dopheide D.; Dalni S. Filho; J. J Pinheiro: Trilateral comparison of static volume: INIMET, PTB, INMETRO. FLOMEKO 2007 Johannesburg, South Africa

[45] Luis. O Becerra, Jorge Nava, Augusto Maury. Comparación bilateral de masa entre CENAM- México e INIMET- Cuba, 2005 Cuba
www.**inimet**.cubaindustria.cu/Inform%20final%20**CENAM**-**INIMET**%202006-03-28.pdf

[46] Navarro M, Tonina A, Luzolino R, Brito J, Alfonzo E, Intercomparación internacional de resistencia eléctrica y tensión de CD.Boletín Científico Técnico INIMET 2006 Cuba

ANEXO A

PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION PARA RECIPIENTES INCLINADOS, CON CENTRO DE MEDICION DESPLAZADO	CODIGO

1. Objetivo y Alcance

Establecer el método y los medios necesarios para la calibración de los recipientes cilíndricos con cabezas planas circulares (recipientes), inclinados, con centro de medición desplazado, por el método geométrico, así como las diferentes etapas de cálculo de los volúmenes parciales

El método de medición que se describe en esta instrucción se corresponde con la línea establecida por el método establecido en la norma API 2551

3. Términos y definiciones.

3.1 Método geométrico: Método de medición indirecto que consiste en determinar la capacidad total o parcial de un recipiente mediante la medición de sus dimensiones realizando los cálculos matemáticos.

3.2 Calibración de recipientes: Proceso para la determinación de la capacidad total del recipiente y de sus capacidades parciales correspondientes a diferentes alturas.

3.3 Recipiente de almacenamiento: Recipiente de forma diversa que sirve para almacenar o depositar sustancias

3.4 Recipiente horizontal: Recipiente de almacenamiento que tiene su eje geométrico paralelo al plano horizontal.

3.5 Recipiente inclinado: Recipiente de almacenamiento donde la relación (conocida como relación E/D) entre la altura de inclinación del tanque y su diámetro es mayor a 0.012

3.6 Altura de inclinación: Distancia vertical existente entre las paralelas horizontales que pasan tangente al borde inferior del tanque en cada cara del mismo

3.7 Prueba hidrostática: Prueba que se realiza a los recipientes de almacenamiento llenándolos de líquido durante un tiempo determinado para conocer su hermeticidad.

3.6 Rolo: Sección cilíndrica, en que se encuentre dividido el recipiente atendiendo a su diseño constructivo o tecnología de fabricación.

3.7 Centro de medición: lugar ubicado en la parte superior del tanque a través del cual se introduce la varilla o cinta con plomada, con el fin de determinar a que altura se encuentra el contenido del líquido almacenado

4. Requisitos del personal.

El personal técnico que aplique esta instrucción debe estar capacitado en metrología general y adiestrado en la calibración de recipientes por el método geométrico. Además se debe dominar el trabajo con microcomputadoras

5. Desarrollo.

5.1 Operaciones y Medios de Calibración:

Las operaciones que se efectúen durante la calibración y los instrumentos de medición que se utilicen se corresponderán con lo que se establece en la Tabla 1.

Tabla 1. Operaciones y medios de Calibración.

Denominación de las operaciones	Número de los apartados	Medios de calibración, parámetros metrológicos y características técnicas normativas
Examen Exterior	5.3.1	Visual
Comprobación de la hermeticidad	5.3.2	Visual
Determinación de la capacidad Determinación de las	5.3.3 5.3.3.1	• Cinta métrica patrón con valor de división de 1 mm . • Pie de Rey con valor de división de 0.05

dimensiones del recipiente (Perímetro exterior, longitud exterior y espesor de la chapa). Angulo de Inclinación (diferencia de planos)		mm . • Medidor de espesor ultrasónico con error máximo permisible de $\pm$ 0.05 mm • Teodolito universal con error de medición de 1 mm, en unidades de longitud

5.2 Condiciones para la calibración.

5.2.1 - El recipiente se encontrará en un lugar accesible y con seguridad de movimiento en sus alrededores para la ejecución de las mediciones, de lo contrario no se continuará el trabajo.

5.2.2 - El recipiente tiene que haber sido sometido previamente a la prueba hidrostática por el propietario o encontrarse lleno de líquido en el momento de la calibración.

5.3. Ejecución de la calibración.

5.3.1- Examen Exterior:

Al realizar este examen se comprueba que

- El recipiente se encuentre limpio exteriormente. En caso contrario deberá limpiarse para permitir un encintado correcto del mismo.
- Los recipientes con volumen nominal hasta 5 m^3 no presenten abolladuras o abombamientos, que excedan de 100 mm de diámetro mayor y 10 mm de índice máximo de flexión. El número máximo de estos no será mayor que 6. En caso contrario se recomendará la calibración por el método volumétrico.
- Los recipientes con volumen nominal mayor que 5 m^3 no presente abolladuras o abombamientos que excedan de 200 mm de diámetro mayor y 20 mm de flexión. El número máximo de estos no será mayor de 6. En caso contrario se recomendará la calibración por el método volumétrico.

5.3.2 Comprobación de la hermeticidad y grado de inclinación

5.3.2.1 La comprobación de la hermeticidad se realiza de forma visual, comprobando que el recipiente no tenga salideros por ninguna de sus partes. No se realizará la calibración de recipientes con salideros.

De no ser posible la comprobación, se obtendrá la conformidad del cliente con que la prueba fue ya realizada, de ser cierto. No se realizará la calibración de recipientes sin la prueba de hermeticidad realizada.

5.3.2.2 La comprobación del grado de inclinación se hará de la siguiente forma:

- El perímetro exterior se determina con ayuda de al cinta métrica patrón realizando dos mediciones como mínimo distribuidas a 1/4 ó 1/5 de las costuras o solapes verticales y uniformemente en cada rolo. A partir del valor del perímetro se determina el diámetro total del tanque ($P = \pi * d$)
- Con ayuda del teodolito se determina la diferencia de planos de ambos extremos del tanque
- Se calcula la relación E/D (diferencia de planos/diámetro total) la cual debe ser mayor a 0.012.
- Se comprueba visualmente que la boca de medición esté desplazada del centro (de ser necesario se debe medir). La boca de medición debe estar desplazada a uno u otro lado del centro y se deben comprobar las condiciones de frontera (Anexo B)

Si alguna de estas dos últimas condiciones se incumple se detendrá el trabajo

5.3.3.Determinación de las capacidades

5.3.3.1 Determinación de las dimensiones del recipiente (Longitud Exterior, Longitud Tope y Espesor de la chapa).

- La longitud exterior del recipiente se determina con ayuda de la cinta métrica patrón, realizando cuatro mediciones como mínimo distribuidas uniformemente alrededor del perímetro y coincidiendo sus extremos con la parte exterior de las cabezas.
- La longitud tope del recipiente se determina con ayuda de la cinta métrica patrón. Se medirá siempre desde la cabeza mas baja, hasta el lugar exacto donde es introducida la cinta con plomada para ejecutar la medición del nivel del líquido
- El espesor de las planchas de los rolos y de las cabezas se determinará con ayuda del medidor ultrasónico de espesor, realizando dos mediciones en cada rolo y en cada cabeza, si el recipiente presenta una capa de pintura gorda y suciedad, se tratará de medir con el pie de rey en los lugares donde sea posible. Cuando esto no ocurra se limpiará la superficie y

se medirá o el dato puede ser tomado de los planos, si se encuentran disponibles estos valores.

- Los valores obtenidos en la determinación de cada una de las dimensiones son reflejadas en el Registro de Calibración (Anexo A)

5.4 Procesamiento de los resultados de las mediciones

El procesamiento de los resultados de las mediciones se realizará en cuatro etapas

5.4.1 Etapa 1.

Se calcula el volumen muerto por medio del software AFORO INCLINADO

Nota: El software no existe aún.

5.4.2 Etapa 2

Esta etapa se ejecuta hasta que la altura de la varilla sea tal que cumpla la condición,

$$l_{totalparcial} = l_{increm} + l_m \leq l_{total}$$

lo cual significa que se ejecuta hasta que el líquido cubra el fondo del tanque . Para determinar esa altura :

- Se calcula la longitud muerta

  $l_m = l_{tope} - l_r$

  donde lr se calcula mediante

  $$lr = h_{total\ varilla} sen\alpha$$

- La longitud incrementada hasta cubrir el fondo del tanque se calcula como

  $$l_{increm} = l_{total} - l_m$$

- la altura de varilla correspondiente a la longitud incrementada en la etapa se determina:

  $$h_{varilla} = \left(l_{total} - l_m\right) sen\alpha$$

- El volumen parcial acumulado se calcula mediante el software AFORO INCLINADO, con el paso deseado, ajustando el último punto a la altura de la varilla, con la precisión que permitan los instrumentos de medición

5.4.3 Etapa 3

Esta etapa se ejecuta hasta que la altura de la varilla sea tal que se cumplan las condiciones establecidas, lo cual significa que se ejecuta hasta que el líquido cubra toda la altura del tanque

en su parte menos elevada. La altura de la varilla que se simboliza como $\sum h_{v.etapa3}$,se calcula mediante

$$\sum h_{v.etapa3} = h_{total.varilla} - l_{tope} sen\alpha$$

A continuación se obtiene el volumen acumulado hasta la altura de la varilla que cumpla la condición anterior, por medio del software AFORO INCLINADO con el paso adecuado, ajustando el último paso de la varilla con la precisión que permitan los instrumentos de medición

5.4.4 Etapa 4

Esta etapa se ejecuta hasta que el líquido alcance la boca de medición. La altura de la varilla en esta etapa equivale a la altura total de la misma. A continuación se obtiene el volumen acumulado hasta la altura de la varilla que cumpla la condición anterior, por medio del software AFORO INCLINADO con el paso adecuado, ajustando el último paso de la varilla con la precisión que permitan los instrumentos de medición

5.5 Presentación de los resultados.

5.5 Los resultados se presentarán en un Tabla, donde se incluirá:

- Número del Certificado de Calibración.
- El número de la página del total de páginas que contiene el Certificado de Calibración
- Número de la tabla.
- Cliente o propietario del recipiente.
- Fecha en que se realizó la calibración
- Número o nombre del recipiente
- Ubicación.
- Instrucción o norma utilizada para la ejecución de las mediciones
- Incertidumbre expandida con k=2 (Anexo C)
- Nombre del Verificador y firma

6.REFERENCIAS.

NC 90-04-13:81 “Recipientes Cilíndricos horizontales con cabezas planas circulares. Métodos y Medios de verificación. Método Geométrico.”

NC 90-04-17:81 “Métodos y medios de medición de volumen. Términos y definiciones”

Guía BIMP-ISO Cálculo de la incertidumbre de las mediciones

ISO 7507-1: 1993 “Petroleum and liquid petroleum products-Calibration of vertical cylindrical tanks.Part 1 Strapping method”

ANEXO A

REGISTRO DE CALIBRACIÓN DE RECIPIENTES

MÉTODO GEOMETRICO

Registro de Calibración (1)_____ Recipiente N. _____(2)_____

Volumen Nominal:_____(3)_____ Fecha:____(4)_____ Calibrado por (firma):_____(5)___

Patrones utilizados:_____(6)_____

_____

RESULTADOS DE LA CALIBRACION

1. Recipiente hermético (7) SI □ NO □

   Nombre y firma de conformidad del cliente _____(8)_____

2. Examen Exterior: Abolladuras o Abombamientos (9) SI □ NO□ Cantidad:_(10)____

   Diámetro mayor:____(11)___ mm Índice máximo de flexión:__(12)_____ mm

3. Boca de medición desplazada (22a) SI □ NO□

4. Determinación de las dimensiones del recipiente:

Mediciones por rolo	Perímetro, m (13)	Longitud, m (14)	Espesor, m (15)	CROQUIS (19)
1 A1			(15a)	
			(15b)	
			A1prom(20)	
2 A2				
		Profundidad (16)		
		1.1	A2prom(20)	
3 B1		1.2		
		1.3		
		1.4	B1prom(20)	
4 B2		promedio (16a)		
		2.1		
		2.2	B2prom(20)	
5 C1		2.3		
		2.4		

	[redacted]	promedio (16b)	C1prom(20)
6 C2			
			C1prom(20)
	[redacted]	Long. tope	
Diferencia de planos(E)		Long. tope corregida	(22)
Perímetro promedio		Angulo de inclinación (α)	
Diametro (D)	(21)	**tan** α	
Relación E/D		**Condiciones de frontera**	SI □ NO□ (23)
Long. Promedio	(17)	**Long. corregida**	(18)

Observaciones: (24)

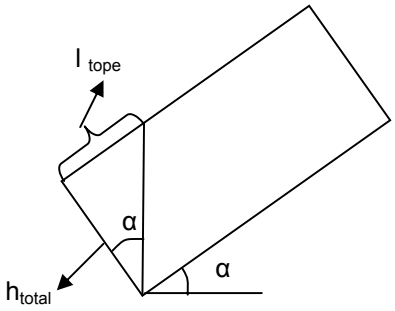
Instrucciones para el llenado

1	Número de orden
2	Número de identificación del recipiente (puede ser un nombre o combustible que almacena)
3	Volumen Nominal declarado por el cliente
4	Fecha de aforo del recipiente
5	Número del verificador ejecuntante de la calibración y firma
6	Patrones utilizados (Rango y número de serie)
7	Recipiente hermético.
8	Nombre y firma de conformidad del cliente con la hermeticidad
9,10	Existencia de abolladuras y cantidad
11,12	Datos de la mayor abolladura
13	Perímetros de los rolos
14	Longitudes del recipiente
15	Espesor promedio de las planchas a-cilindro b- cabezas
16	Profundidades del recipiente
	16 a Profundidad promedio de una cara del recipiente (18)
	16 b Profundidad promedio de la otra cara del recipiente (18)
17	Longitud promedio de (17)
18	Longitud corregida por profundidad, igual a la diferencia de (17) menos (16a+16b)
19	Croquis del recipiente. (lo mas detallado posible)
20	Promedio de los perímetros de cada rolo
21	Diámetro calculado a partir del perímetro
22	Longitud tope corregida correspondiente a la posición de la boca de medición y que se refleja en el croquis
	22a Se anotará después de analizado los datos si la boca de medición está desplazada. (se puede corroborar también a simple vista)
23	Condiciones de frontera si se cumplen ambas
24	Observaciones de carácter general

ANEXO B

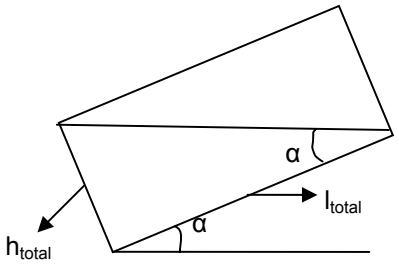
CONDICIONES DE FRONTERA

Si el tanque se encuentra levantado del lado derecho:



$l_{tope} > h_{total} \tan\alpha$

Condición de la frontera izquierda



$$\tan\alpha < \frac{h_{total}}{l_{total}}$$

Condición de la frontera derecha

ANEXO C

ESTIMACION DE LA INCERTIDUMBRE

Para el cálculo se estableció el modelo matemático:

primera etapa

$$Vm = 2\int_0^m dy \int_0^{a+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx = Vregistro \qquad (2.4)$$

segunda etapa

$$V = 2\int_0^w dy \int_0^{a+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx = Vregistro \qquad (2.15)$$

tercera etapa

$$V = 2\int_0^{l-2s} dy \int_0^{k+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx + 2\int_0^{l-2s} dy \int_{k+by}^{a+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx = Vregistro$$

cuarta etapa

$$V = 2\int_0^{l_{increm.etapa\,4}} dy \int_{a+by}^{a} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx + 2\int_{l_{increm.etapa\,4}}^{l-2s} dy \int_{a+by}^{q+by} dz \int_0^{\sqrt{r^2-(z-r)^2}} dx = Vregistro$$

(2.44)

donde los parámetros de estas integrales dependen de:

- l_{tope} (t)
- $D_{\text{iferencia de planos}}$ (d)
- l_{total} (l)
- $P_{\text{erímetro}}$. (p)
- π
- E_{spesor} (s)
- $h_{varilla}$ (v)

Fuentes de incertidumbre:

- l_{tope} (t) Por la utilización de la cinta
- $D_{\text{iferencia de planos}}$ (d) Por la utilización del teodolito
- l_{total} (l) Por la utilización de la cinta
- $P_{\text{erímetro}}$. (p) Por la utilización de la cinta
- π Por su aproximación

- E_{spesor} (s) Por la utilización del medidor de espesor
- $h_{varilla}$ (v) Por la utilización de la cinta

Incertidumbre en la determinación del perímetro.

Componentes de incertidumbre:

- Incertidumbre Tipo B debido a la utilización de la cinta. Aquí están presentes las componentes:

a- Error máximo permisible de la cinta.

$$E_M = \pm(10 + 10L)\mu m \;\; Lenm$$

Para 50 m E= ± 510 µm

E≈ ± 0.5 mm

por (T.5)

$$u_1 = \frac{0.5mm}{\sqrt{3}} = 0.3mm$$

b- Variación de la longitud de la cinta producto de la temperatura.

Considerando el coeficiente de dilatación lineal del acero (11,0±1) · 10^{-6} ºC^{-1} , que no se hacen correcciones y que además la temperatura puede tomar valores hasta 40 ºC, para la longitud máxima de 50 m:

$$\Delta l_{max} = l_{max} \cdot 11{,}5 \cdot 10^{-6}(t - 20)$$
$$= 50m \cdot 11{,}5 \cdot 10^{-6\,o} C^{-1}(40 - 20)^o C$$
$$= 1.15\, mm$$

por (T.5)

$$u_2 = \frac{\Delta l_{max}}{\sqrt{3}} = \frac{1.15\, mm}{\sqrt{3}} = 0.66\, mm$$

La incertidumbre debido a la utilización de la cinta será la raíz de la suma cuadrática de sus componentes

$$u_3 = \sqrt{(0.3)^2 + +(0.66)^2} = 0.72 \cdot 10^{-3}\, m$$

Incertidumbre en la determinación del espesor

La incertidumbre expandida del medidor de espesor es U=0.4 μm ,

por (T.1)

$u_4 = 0.2 \cdot 10^{-6}\, m$

Incertidumbre en la determinación del largo.

Al igual que en la determinación del perímetro es de:

$u_5 = 0.72 \cdot 10^{-3}\, m$

Incertidumbre en la determinación de π.

π=3,141592 con incertidumbre estándar relativa:

por (T.5)

$u_6 = \frac{0{,}0000005}{\sqrt{3}} = 3 \cdot 10^{-7}$

Incertidumbre en la determinación de la longitud tope

Al igual que en la determinación del perímetro es de:

$u_7 = 0.72 \cdot 10^{-3}\, m$

Incertidumbre en la determinación de la diferencia de planos

Incertidumbre Tipo B debido a la utilización del teodolito

Error máximo permisible del teodolito.

$E_M = 0.001 m$

por (T.5)

$u_8 = \frac{1\ mm}{\sqrt{3}} = 0.578\ mm$

Determinación de la incertidumbre combinada y expandida

La incertidumbre combinada se determina para cada una de las etapas, usándose la mayor de ellas, y para el caso del recipiente mas crítico para obtener la incertidumbre expandida. Para obtener esos valores es necesario calcular los coeficientes de sensibilidad de cada fuente de incertidumbre (derivadas parciales) (Anexo CD)

A partir de esos resultados y por medio de la ley de propagación de la incertidumbre (1.14) y que para nuestro caso es

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial V_c}{\partial \pi}\right)^2 \cdot u_\pi^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial p}\right)^2 \cdot u_p^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial s}\right)^2 \cdot u_s^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial l}\right)^2 \cdot u_l^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial t}\right)^2 \cdot u_t^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial d}\right)^2 \cdot u_d^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial v}\right)^2 \cdot u_v^2} \quad (3.1)$$

se obtiene el valor de la incertidumbre combinada y después se obtiene la incertidumbre expandida para un valor de k (factor de cobertura k=2) (Anexo CD)

$$U_{\exp} = k u_c \quad (3.2)$$

Nota: Todas las mediciones que se realizan en el caso de aforos geométricos son independientes, y no están correlacionadas una con la otra y la expansión de Taylor es suficiente dejarla solo en su primer término, en el caso que nos ocupa y en [43]

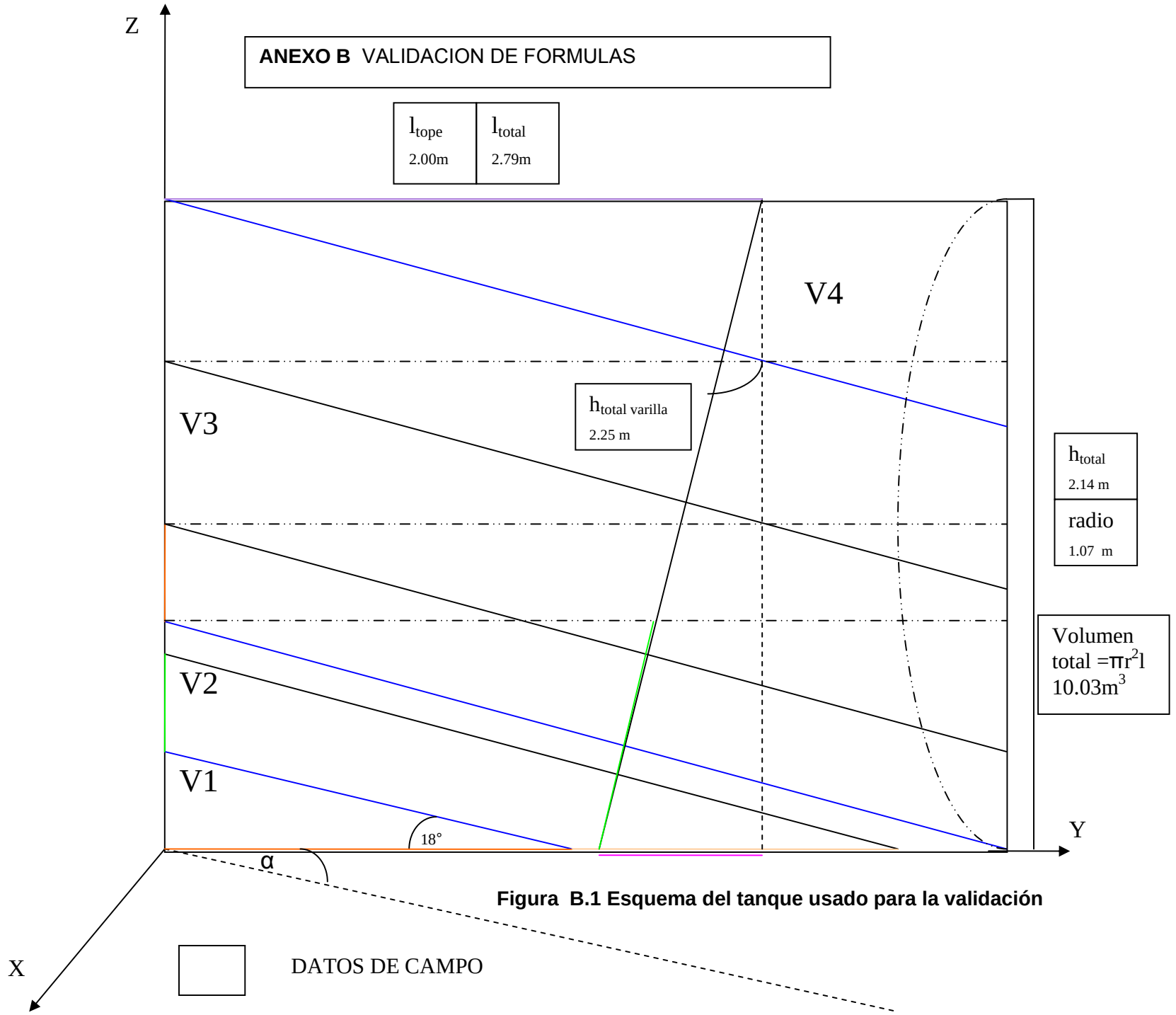


Figura B.1 Esquema del tanque usado para la validación

Para la validación de las fórmulas se siguió el siguiente procedimiento:

Primera etapa

Se comprobaron físicamente la longitud muerta l_m y la altura muerta h_m y se calcularon por las fórmulas correspondientes

parámetro	medición real	cálculo por fórmula
l_m	1.31 m	1.30 m
h_m	0.42 m	0.42 m

Segunda etapa

Se comprobaron físicamente la longitud muerta l_{increm} para determinada altura de varilla (0.33m) y la altura total parcial correspondiente, y se calcularon por las fórmulas correspondientes

parámetro	medición real	cálculo por fórmula
l_{increm}	0.98 m	0.96 m
h_m	0.36 m	0.35 m

Tercera etapa

Se ejecuto el cálculo de la integral correspondiente,

$$V = 2\int_0^{2.79} dy \int_0^{2.14-0.32y} dz \int_0^{\sqrt{1.07^2-(z-1.07)^2}} dx$$

donde los límites de integración se calcularon mediante las fórmulas descritas en la etapa.

Se obtuvo un valor de 8.37 m^3

Cuarta etapa

Se ejecuto el cálculo de la integral correspondiente,

$$V = 2\int_0^{2.79} dy \int_{2.14-0.32y}^{2.14} dz \int_0^{\sqrt{1.07^2-(z-1.07)^2}} dx$$

donde los límites de integración se calcularon mediante las fórmulas descritas en la etapa.

Se obtuvo un valor de 1.66 m^3

Volumen (3 etapa)+Volumen (4 etapa)= 10.03 m^3, cuyo valor coincide con el valor obtenido por la fórmula general para el volumen de un cilindro.

Nota: Se utilizó para la obtención del resultado el software DERIVE ver 6.00 (Anexo CD)

Validación parcial

Para la validación parcial se tomó una muestra de16 tanques inclinados y se tomó una altura que coincidiera con la etapa 3 y se supuso la boca de medición en el centro del tanque, donde se debe obtener un resultado similar al caso, si el tanque estuviera situado horizontalmente. (Tabla 2)

Tabla 2 Datos de validación parcial

Tanque N.	altura de medición cm	altura de varilla	volumen horizontal* m^3	volumen inclinado m^3	diferencia en el volumen total l
1	92.0	92.2	10.039	10.040	1
2	139.0	139.3	9.458	9.458	1
3	56.0	56.1	0.989	9.990	0
4	110.0	110.3	7.906	7.907	0
5	100.0	100.2	5.536	5.536	0
6	45.0	45.1	0.567	0.567	0
7	170.0	170.4	100.375	100.379	2
8	95.0	95.2	12.610	12.611	1
9	77.0	77.1	4.272	4.272	0
10	94.0	94.2	1.127	1.127	0
11	59.0	59.1	2.468	2.468	0
12	94.0	94.2	1.125	1.125	0
13	63.0	63.1	1.076.	1.076	0
14	90.0	90.2	7.729	7.730	0
15	76.0	76.1	1.115	1.115	0
16	34.0	34.1	0.023	0.023	0

* los valores fueron obtenidos del resultado del aforo de recipientes por parte de la oficina territorial de normalización a discreción de los clientes, utilizando para ello el software AFORO.EXE establecido en el sistema nacional de metrología

Validación general

Para la comprobación general del modelo se establece la fórmula general y se calculan las derivadas parciales, y donde el volumen total no debe depender del grado de inclinación y de la longitud tope. En ambos casos (anexo CD) el valor obtenido de la derivada parcial con respecto a esas magnitudes fue igual a cero y no así en el caso del resto de las magnitudes.

ANEXO C

Guía para la evaluación y expresión de la incertidumbre de las mediciones	CODIGO

1. Objetivo y alcance

El objetivo de este procedimiento es recomendar una guía para la evaluación y expresión de la incertidumbre en todas las calibraciones que se realizan en un laboratorio. El mismo es aplicable a todas las instrucciones de calibración de cualquier instrumento de medición o medida materializada. Lo planteado en este documento no constituye una receta a aplicar de forma obligatoria. Por el amplio espectro de los sistemas de medición que intervienen en cada caso específico, para su aplicación correcta en ocasiones se necesita de un conocimiento más profundo de la Guía BIMP- ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones y del dominio en detalle del procedimiento de medición a considerar.

2. Generalidades

2.1 La utilización o no de los elementos opcionales depende de su aplicabilidad o no en el caso de la actividad que se regule. Esto quiere decir que dichos elementos solo pueden ser omitidos cuando definitivamente no procedan para la actividad que se regula.

3. **Referencias normativas**

Los siguientes documentos contienen disposiciones que, mediante referencias en este texto, constituyen disposiciones de este procedimiento. Todos los documentos están sujetos a revisión por lo que se utilizarán las versiones o revisiones vigentes en el momento de su utilización.

NC-ISO 9000: 2000 “Sistemas de gestión de la calidad. Fundamentos y vocabulario”

NC-ISO 17025: 2000 “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración”

Guía BIPM-ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones. Traducción del CENAM. México. 1994

3. RESPONSABILIDADES.

El jefe y quien se establezca deben garantizar que se evalúe la incertidumbre de las mediciones para las nomenclaturas declaradas.
Los Técnicos deben evaluar la incertidumbre de las mediciones que realicen y reportarlas en los certificados de calibración que emitan, según las instrucciones de calibración correspondientes.

4. Descripción de la actividad que se regula

4.1 Evaluación y expresión de la incertidumbre del resultado de la medición.

Los pasos a seguir para el cálculo de la incertidumbre son los siguientes:

- Expresar el modelo matemático de la medición.
- Relacionar y evaluar todas las posibles fuentes de incertidumbre.
- Calcular la incertidumbre estándar combinada.
- Calcular la incertidumbre expandida U(y) considerando un factor de cobertura k=2.
- Reportar la incertidumbre.

4.1.1 Modelo matemático de la medición.

En la mayoría de los casos la magnitud a medir y no se mide directamente, sino que se determina a partir de otras magnitudes $x_1, x_2, \ldots, x_m$ a través de una relación funcional f.

$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_m) \qquad (1)$$

Ejemplo: Para la determinación del valor de las pesas en un manómetro de pistón y pesas se utiliza la siguiente expresión:

$$m_i = \frac{g_n \cdot A_e \cdot P \cdot \left(1 + \rho_a / \rho_m\right)}{g_l}$$

Donde:

m_i --- Masa de la i-ésima pesa.
g_n –- Aceleración normal de la gravedad.
A_e –- Arrea efectiva del pistón del manómetro de pistón y pesas patrón.
P --- Presión creada por la i-ésima pesa.
ρ_a – Densidad del aire.
ρ_m – Densidad del material de la pesa.
g_l – Aceleración local de la gravedad.

Las magnitudes de entrada x_j pueden ser correcciones o factores de corrección de un instrumento de medición, pueden ser correcciones por el efecto de algunas magnitudes influyentes o magnitudes que toman en cuenta otras fuentes de variabilidad tales como diferentes observadores, instrumentos, laboratorios y el tiempo en que las observaciones son hechas.

La función f no debe expresar sólo una ley física sino el proceso de medición, y en particular, estas deben contener todas las magnitudes que pueden contribuir con una incertidumbre significativa al resultado de la medición.

4.1.2 Relación de las posibles fuentes de incertidumbre.

Una relación de las posibles fuentes de incertidumbres aparece en la tabla 1.

Tabla 1 Relación de las posibles fuentes de incertidumbre.

Posibles fuentes de incertidumbre	**Evaluación de la incertidumbre estándar**	**Observaciones**
Incertidumbre determinada a partir de los resultados establecidos en el certificado de calibración, para los instrumentos patrones y auxiliares. **Nota:** Estos casos se utilizan cuando se emplean los valores verdaderos de los patrones empleados.	$u = \frac{U}{k}$	U: Incertidumbre expandida reportada en el certificado de calibración. k- Factor de cobertura.
	$u = \frac{U}{t_{p(\nu)}}$	Se emplea cuando la incertidumbre ha sido reportada para una probabilidad "p" y "ν" grados de libertad. ***t-*** Coeficiente de Student para probabilidad "p" y "ν" grados de libertad.(Ver tabla G.2 Guía de incertidumbre)
	$u = S(\overline{X})$	Se emplea cuando la incertidumbre que aparece en el certificado de calibración del patrón se establece como un múltiplo de la desviación estándar. En este caso la incertidumbre estándar coincide con la desviación estándar.
	$u = \frac{U}{p}$	Se emplea cuando la incertidumbre que aparece en el certificado de calibración está expresada como un intervalo definido con un nivel de confianza de 90, 95 ó 99% . ***p=*** 1,64 para un nivel de confianza de 90 % ***p=*** 1,96 para un nivel de confianza de 95 % ***p=*** 2,58 para un nivel de confianza de 99 % (Ver tabla G.1 Guía de incertidumbre)
Por el error máximo permisible (e.m.p) del instrumento patrón empleado	$u = \frac{emp}{\sqrt{P}}$	Se utiliza cuando se emplean los valores nominales de los patrones empleados. ***P=*** 3 si se asume una distribución simétrica y rectangular ***P=*** 6 si se asume una distribución triangular. ***P=*** $(2.58)^2$ si se asume una distribución normal para una "p" del 99%.
Por errores no controlados (efectos aleatorios)	Si n ≥ 10 $u = S(\overline{X}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2}{n(n-1)}}$	$S(\overline{X})$ -Desviación estándar experimental de la media $(\overline{X}) = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$ donde n- cantidad de mediciones
	Si n <10 $u = t_k \cdot S(\overline{X})$	Los valores del factor t_k se dan en la tabla 2 para p= 95 %
	Si n ≤3 $u = \frac{X_{max} - X_{min}}{\sqrt{12}}$	Si se asume una distribución uniforme en los límites del recorrido máximo. Esto debe aplicarse en los niveles inferiores de la cadena de calibración donde es común que n ≤ 3.

Tabla 1 Relación de las posibles fuentes de incertidumbre. Continuación.

Posibles fuentes de incertidumbres	**Evaluación de la incertidumbre estándar**	**Observaciones**
Resolución del instrumento de medición que se calibra (r).	$u = \frac{r}{\sqrt{12}}$	***r***-Resolución de una indicación digital (menor dígito significativo)
Apreciación en el instrumento de medición que se calibra (a).	$u = \frac{\eta \cdot Vd}{\sqrt{12}}$	***η-*** Fracción apreciable del valor de división (1/1;1/3;1/4;1/10 etc.) del instrumento que se calibra ***Vd***-Valor de división del instrumento que se calibra
Magnitudes influyentes y otros efectos que pueden ser causa de incertidumbre .	$u = \frac{H}{\sqrt{P}}$ ó $u = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{12}}$	H-magnitud influyente Se utiliza cuando se emplean los valores nominales de los patrones empleados. ***P=*** 3 si se asume una distribución simétrica y rectangular ***P=*** 6 si se asume una distribución triangular. ***P=*** $(2.58)^2$ si se asume una distribución normal para una “p” del 99%. Magnitudes influyentes: • Temperatura. • Presión atmosférica • Aceleración de la gravedad, etc. Otros efectos: • Histéresis, linealidad, derivas. • Correcciones, redondeos, valores de constantes físicas y matemáticas.

Tabla No. 2 Valor del factor t_k en función del número de mediciones n .

n	2	3	4	5	6	7	8	9
t_k	7.0	2.3	1.7	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2

4.1.3 Cálculo de la incertidumbre estándar combinada.

a) Si las magnitudes de entrada no están correlacionadas :

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right)^2 \cdot u^2(x_j) + \sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} \left[\frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k}\right)^2 + \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial^3 f}{\partial x_j \partial x_k^2}\right] \cdot u^2(x_j) \cdot u^2(x_k)} \qquad (2)$$

Nota: Cuando la no linealidad de ***f*** no es significativa, no se tendrán en cuenta los términos de mayor orden en la expresión de $\mathbf{u_c(y)}$, por lo tanto la expresión quedará de la siguiente forma:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right)^2 \cdot u^2(x_j)} \qquad (3)$$

b) Si las magnitudes de entrada están correlacionadas:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right)^2 \cdot u^2(x_j) + 2\sum_{j=1}^{m-1}\sum_{k=j+1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_k}\right) \cdot u(x_j) \cdot u(x_k) \cdot r(x_j, x_k)} \qquad (4)$$

donde, el coeficiente de correlación ***r*** es :

$$r(x_j, x_k) = \frac{u(x_j, x_k)}{u(x_j) \cdot u(x_k)} \qquad (5)$$

y

$$u(x_j, x_k) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (x_{ji} - \bar{x}_j) \cdot (x_{ki} - \bar{x}_k) \qquad (6)$$

Cuando las magnitudes de entrada están correlacionadas con $\mathbf{r(x_j,x_k)=1}$, entonces:

$$u_c(y) = \sum_{j=1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) \cdot u(x_j) \qquad (7)$$

4.1.4 Cálculo de la incertidumbre expandida ***U(y).***

$$U(y) = k \cdot u_c(y) \qquad (8)$$

Se prefiere utilizar un factor de cobertura k=2.

4.1.5 Reporte de la incertidumbre.

- Reporte el valor de la incertidumbre expandida ***U(y)*** junto con el factor de cobertura utilizado para obtenerla (k=2).

  U(y) = c con k=2.

  Donde c es el valor de la incertidumbre expandida con su correspondiente unidad de medida.

- Se podrá reportar el valor de la incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$ en aquellos casos en que la práctica internacional la utiliza. Estos pueden ser los casos de comparaciones internacionales, la determinación de constantes fundamentales, etc.

ANEXO D

TABLA N.1 REGISTRO DE TANQUES INCLINADOS Y CON BOCA DE MEDICION DESPLAZADA DEL CENTRO

N	l_{tope} (t) m	$h_{total varilla}=\frac{p-2\pi s}{\pi \cos\alpha}$ (h) m	l_{total} (l) m	diferen. de planos (d) m	perímetro exterior (p) m	Espesor (s) m	$h_{total}=\frac{p-2\pi s}{\pi}$ (h_{total}) m	$\alpha = arcsen\frac{d}{l_{total}}$ (α) grado	Condición Izquierda $l_{tope} \rangle h_{total} \tan\alpha + s$ m	Condición Derecha $\tan\alpha \langle \frac{h_{total}}{l_{total}-2s}$	$\frac{dif.planos}{h_{total}} \rangle 0.012$
1	2.000	2.250	2.790	0.850	6.778	0.009	2.140	17.74	2.000 0.690	0.690 0.767	0.397
2	0.380	2.151	5.440	0.331	6.780	0.005	2.148	3.43	0.380 0.120	0.060 0.390	0.150
3	0.310	1.081	1.066	0.183	3.392	0.007	1.066	9.78	0.310 0.180	0.170 1.000	0.160
4	0.750	1.137	3.002	0.372	3.578	0.005	1.129	7.08	0.750 0.140	0.120 0.920	0.140
5	0.500	1.435	1.544	0.201	4.510	0.006	1.424	7.08	0.500 0.170	0.120 0.920	0.140
6	0.780	1.449	3.037	0.160	4.580	0.005	1.448	2.86	0.780 0.070	0.050 0.370	0.110
7	0.300	1.401	1.217	0.060	4.420	0.004	1.399	2.86	0.300 0.070	0.050 1.150	0.040
8	1.050	1.346	2.859	0.042	4.273	0.005	1.346	0.80	1.050 0.020	0.010 0.470	0.030
9	0.600	1.828	3.124	0.159	5.767	0.005	1.826	2.86	0.600 0.096	0.050 0.590	0.090
10	0.600	1.843	3.109	0.160	5.817	0.005	1.841	2.86	0.600 0.096	0.050 0.590	0.090
11	0.300	1.128	2.008	0.031	3.575	0.005	1.128	0.80	0.300 0.020	0.020 0.560	0.030
12	0.320	0.887	1.467	0.08	2.815	0.005	0.886	2.86	0.320 0.040	0.050 0.600	0.090